

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ ROBERTO HINO JÚNIOR

PENETRAÇÃO DE CLORETO EM CONCRETOS DE DIFERENTES
RESISTÊNCIAS E TEORES DE ADIÇÃO POZOLÂNICA A PARTIR DA
COMPARAÇÃO DE DIFERENTES NORMAS

CURITIBA

2019

JOSÉ ROBERTO HINO JÚNIOR

PENETRAÇÃO DE CLORETO EM CONCRETOS DE DIFERENTES
RESISTÊNCIAS E TEORES DE ADIÇÃO POZOLÂNICA A PARTIR DA
COMPARAÇÃO DE DIFERENTES NORMAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior

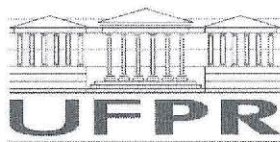
CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- H663p Hino Júnior, José Roberto
Penetração de cloreto em concretos de diferentes resistências e teores de adição pozolânica a partir da comparação de diferentes normas [recurso eletrônico] / José Roberto Hino Júnior – Curitiba, 2019.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil.
Orientador: Ronaldo Alves de Medeiros Junior
1. Concreto (durabilidade). 2. Corrosão por cloretos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros Junior, Ronaldo Alves de III. Título.
- CDD: 620.1122

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOSÉ ROBERTO HINO JÚNIOR** intitulada: **Penetração de cloretos em concretos de diferentes resistências e teores de adição pozolânica a partir da comparação de diferentes normas**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 01 de Abril de 2019.


RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


WELLINGTON MAZER
Avaliador Externo (UTFPR)


MARIANA D OREY GAIVÃO PORTELLA BRAGANÇA
Avaliador Interno

Aos meus pais, Márcia e Beto, eternos confiantes do meu esforço.

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho, dividir os diversos momentos com diversas pessoas – direta ou indiretamente e com maior ou menor frequência – foi essencial. Apesar da distância, o propósito em dividir os méritos e esforços desta dissertação e, ao mesmo tempo, motivar e incentivar a minha família foi sempre um combustível para concluir esta etapa. Portanto, à minha mãe, Márcia A. F. Gomes Hino, ao meu pai, José Roberto Hino e à minha irmã, Ana Carolina Gomes Hino, além de toda a minha família, acolhedora e sempre almejando as melhores conquistas, a minha eterna gratidão.

Pessoalmente, o conceito de família foi muito mais amplo. Seja no âmbito acadêmico, profissional ou pessoal, as diversas amizades de alguma forma presentes, transformaram qualquer desânimo em novos motivos para buscar, em qualquer ocasião, me esforçar para sempre dar o máximo de mim. Fossem amigos de longa data ou aqueles conquistados durante o mestrado, o simples compartilhar de suas presenças – num café no meio do expediente ou na madrugada de escrita, num almoço ou janta improvisado de última hora, numa aula de circo ou de yoga, numa moldagem de corpos de prova ou leitura de algum ensaio, num momento de desabafo ou até inconformidade, numa viagem planejada para rever pessoas distantes ou aquela visita ansiada durante meses – se tornou uma representação de constante motivação e inspiração para me desenvolver sempre mais, como pessoa e como profissional. À improbabilidade de contemplar a todos, abstenho-me de citar nomes, porém confio que os responsáveis se sentirão contemplados pelas minhas palavras.

Ao Prof. Ronaldo A. de Medeiros Junior, um agradecimento especial pela orientação e pela dedicação ao meu Mestrado, contemplando aprendizados diretos ou indiretos durante a pesquisa e o mundo acadêmico, além das incontáveis reuniões para buscarmos soluções para o trabalho ou o laboratório.

Gostaria de agradecer à CAPES, ao CNPQ, à Fundação Araucária, à Itambé Cimentos, às Universidades UEPG e UTFPR e ao Escritório EMEA, pela possibilidade de realização deste trabalho.

RESUMO

Regiões litorâneas abrigam uma crescente parcela da população que demanda investimentos em infraestrutura. A durabilidade e manutenção das estruturas de concreto armado nesse ambiente, no entanto, são comprometidas em função da elevada agressividade – reflexo da grande concentração de íons agressivos, como o cloreto. Nesse sentido, conhecer os mecanismos de transporte e combinação do cloreto no interior do concreto, bem como ampliar o conhecimento acerca do efeito de adições minerais sobre a durabilidade do concreto, faz-se necessário. Este trabalho propõe a análise da combinação de três classes de resistência de concreto (25, 35 e 45 MPa) com a dosagem de cimento variando o teor de cinza volante (0, 12,5 e 27%), ensaiados conforme quatro normas de estudo da penetração do cloreto em concreto: ASTM C1202:2017, NT BUILD 492:1999, AASHTO T259:1980 e NT BUILD 443:1995. Além dos ensaios de investigação, os concretos foram caracterizados em função da resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias, absorção por capilaridade e absorção por imersão. Foram realizadas análises de microestrutura em amostras de concreto antes e após a exposição ao cloreto, a partir das técnicas de difração de raios-x (DRX), porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir da comparação dos resultados, foi notável o efeito físico da cinza volante sobre a qualidade do concreto em relação à resistência à compressão e à penetração de cloreto. Com relação ao efeito químico da adição mineral sobre a formação de sal de Friedel, nem todos os métodos de análise evidenciaram este fato. A maior problemática apresentada pelo método ASTM diz respeito à variação da temperatura e mobilidade iônica. O método acelerado nórdico apresentou uma alternativa ao aquecimento da solução durante o ensaio ajustando a tensão e variando o tempo de exposição. A metodologia proposta pela AASHTO apresentou uma influência da condição de saturação do concreto durante o ensaio, enquanto que a norma nórdica de ensaio de longa duração, apesar da elevada concentração salina, mostrou indícios da formação do sal de Kuzel. Finalmente, o desenvolvimento de uma norma nacional que contemple os aspectos negativos elencados neste estudo torna-se viável, buscando uma representatividade precisa do ingresso de cloreto no concreto.

Palavras-chave: Durabilidade. Corrosão por cloretos. Coeficiente de difusão. Coeficiente de migração. Cinza volante. Combinação do cloreto.

ABSTRACT

Coastal regions are home to a growing parcel of the population which demands infrastructure investments. However, durability and maintenance of reinforced concrete structures settled in this environment are compromised due to high aggressiveness – result of the great concentration of aggressive ions, such as chloride. In this sense, it is necessary to understand the transport mechanisms and chloride binding inside the concrete, as well as increasing the knowledge about the effect of mineral additions on concrete durability. This work proposes the analysis of the combination of three classes of concrete strength (25, 35 and 45 MPa), with different content of fly ash in the concrete mix (0, 12,5 e 27%), tested according to five standards for chloride penetration into concrete: ASTM C1202:2017, NT BUILD 492: 1999, AASHTO T259:2017 and NT BUILD 443:1995. In addition to investigation tests, concretes were characterized by axial compressive strength at 28 and 91 days, by capillary absorption and immersion absorption. X-ray powder diffraction (XRD), mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscopy (SEM) analysis were carried out into some concrete samples before and after chloride exposure. Comparing the results, physical effect of fly ash on concrete quality concerning the compressive strength and the chloride penetration was remarkable. Regarding the chemical effect of the mineral admixture on Friedel's salt formation, some analysis did not evidenced this fact. The major problem presented by the ASTM method lies on temperature and ionic mobility. The Nordic accelerated method presented an alternative to heating during the test by adjusting voltage and varying the exposure time. AASHTO methodology showed an influence of saturation condition of concrete during the test, while the long-term Nordic test, despite of its high saline concentration, evidenced the Kuzel's salt. Finally, developing a national standard that contemplates the aspects pointed out in this study becomes feasible, aiming a precise representativeness of chloride ingress into concrete.

Key-words: Durability. Chloride-induced corrosion. Diffusion coefficient. Migration coefficient. Fly ash. Chloride binding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partículas de cinza volante em concreto com 28 e 90 dias de cura vistas no MEV	30
Figura 2 – Partículas de cinza volante vistas no MEV, com 180 dias de cura..	32
Figura 3 – Concentração de cloretos no interior do concreto em função da proximidade da estrutura com o mar	34
Figura 4 – Representação esquemática do perfil de cloretos no interior do concreto	40
Figura 5 – Difrátograma de amostra de concreto contendo cinza volante mostrando picos referentes ao sal de Friedel (FS), sal de Kuzel (KS), hidróxido de cálcio (CH), etringita (AFt), mulita (M) e gesso (G)	43
Figura 6 – Estrutura morfológica do sal de Friedel.....	43
Figura 7 – Placas de sal de Friedel presente junto à etringita.....	44
Figura 8 – Sal de Friedel (estrutura hexagonal) visível em amostra de concreto contendo cinza volante (3 dias de idade).....	44
Figura 9 – Sistema hexagonal “escamoso” do sal de Friedel, em amostra de concreto contendo cinza volante (28 dias de idade)	44
Figura 10 – Perfil de cloretos totais, livre e combinados de amostra de concreto sem cinza volante ($a/c = 0,47$)	46
Figura 11 – Perfil de cloretos totais, livre e combinados de amostra de concreto contendo 15% cinza volante ($a/c = 0,47$)	47
Figura 12 – Perfil de cloretos totais, livre e combinados de amostra de concreto contendo 30% cinza volante ($a/c = 0,47$)	47
Figura 13 – Variação da concentração de cloreto em função da deposição do íon, decorrente do ambiente de exposição	50
Figura 14 – Resumo do planejamento experimental	57
Figura 15 – Esquema dos corpos de prova cilíndricos de concreto para ensaios de caracterização e penetração de cloreto	60
Figura 16 – Esquema dos corpos de prova prismáticos de concreto para ensaio de difusão natural (AASHTO T259:1980).....	60
Figura 17 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	63
Figura 18 – Curva granulométrica do agregado miúdo	64

Figura 19 – Diagrama de dosagem realizado pelo método IPT/EPUSP, com teor de argamassa de 53%	65
Figura 20 – Resultados de resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias de cura úmida das amostras de concreto	68
Figura 21 – Ensaio de absorção por capilaridade	70
Figura 22 – Ruptura da amostra cilíndrica para leitura de altura capilar (em mm) da água absorvida pelo concreto	71
Figura 23 – Indicação dos discos de concreto utilizados para ensaio conforme a norma ASTM C642:2013.....	72
Figura 24 – Corpos de prova cilíndricos (esquerda) e discos (direita) de concreto imersos em água para análise da absorção por imersão	73
Figura 25 – Representação da divisão de um corpo de prova cilíndrico (\varnothing 100 x 200mm) em quatro amostras	76
Figura 26 – Configuração da amostra selada com silicone na célula de acrílico e ajuste de tensão para início do ensaio pela ASTM C1202:2017	77
Figura 27 – Aspersão de solução contendo AgNO_3 nas amostras após finalização do ensaio de migração	78
Figura 28 – Esquema de preparo do corpo de prova e suporte de madeira para garantir a inclinação prevista para o ensaio da norma NT BUILD 492:1999....	79
Figura 29 – Configuração do ensaio de corpo de prova de concreto e aferição da temperatura na solução anódica, de acordo com a norma NT BUILD 492:1999	80
Figura 30 – Medida de penetração de cloreto após aspersão de AgNO_3 com gabarito para leituras.....	81
Figura 31 – Variação da temperatura e da umidade relativa da câmara seca durante o ensaio proposto pela norma AASHTO T259:1980	82
Figura 32 – Esquema do corpo de prova prismático preparado para conter a solução de 3% de NaCl por 90 dias	83
Figura 33 – Representação esquemática de análise de concreto após exposição a solução de cloreto, conforme AASHTO T259:1980.....	84
Figura 34 – Demarcação do corpo de prova prismático para divisão e ruptura ao meio	84
Figura 35 – Amostras imersas em solução saturada de hidróxido de cálcio	85
Figura 36 – Preparo das amostras cilíndricas com esmalte sintético	86

Figura 37 – Representação esquemática dos corpos de prova submersos	87
Figura 38 – Procedimentos realizados nas amostras de concreto após exposição a solução de 16,5% de NaCl, conforme previsto pela norma NT BUILD 443:1995.....	87
Figura 39 – Moagem de amostra de concreto e armazenamento do pó (passante na peneira de abertura 0,075mm) para análise por DRX	88
Figura 40 – Região de coleta de amostra para análise de DRX em amostra contaminada após o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999	89
Figura 41 – Representação da amostra de concreto (1 cm ³) e procedimento de coleta para ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	90
Figura 42 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado para gerar imagens de microestrutura das amostras de concreto	92
Figura 43 – Absorção capilar do concretos moldados com cimento CPV-ARI .	95
Figura 44 – Absorção capilar dos concretos moldados com cimento CPII-Z ...	95
Figura 45 – Absorção capilar dos concretos moldados com cimento CPIV	95
Figura 46 – Sortividade das amostras de concreto, em função da classe de resistência e tipo de cimento	96
Figura 47 – Correlação entre a resistência média à compressão (91 dias) e a sortividade	97
Figura 48 – Influência do teor de adição de cinza volante sobre a sortividade	98
Figura 49 – Altura capilar das amostras de concreto, em função da classe de resistência e tipo de cimento	99
Figura 50 – Absorção por imersão das amostras de concreto (cilindros e discos), em função da classe de resistência e tipo de cimento	101
Figura 51 – Correlação dos resultados de absorção por imersão de amostras de concreto cilíndricas e discos.....	102
Figura 52 – Correlação entre a sortividade e a absorção por imersão de cilindros e discos de concreto	103
Figura 53 – Correlação entre a resistência média à compressão (91 dias) e a absorção por imersão de cilindros e discos de concreto	104
Figura 54 – Influência do teor de adição de cinza volante sobre a absorção por imersão de cilindros e discos de concreto.....	104
Figura 55 – Carga passante nas amostras de concreto durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017	106

Figura 56 – Profundidade de penetração de cloreto, segundo precipitação de cloreto de prata nas amostras recém ensaiadas.....	108
Figura 57 – Comparação múltipla de médias dos resultados provenientes do ensaio pela norma ASTM C1202:2017	109
Figura 58 – Relação da carga passante com o teor de adição de cinza volante	110
Figura 59 – Correlação entre a profundidade de penetração do cloreto no concreto e a carga passante	111
Figura 60 – Limites de temperatura alcançados para amostras de concreto com cimento CPV-ARI durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017	112
Figura 61 – Limites de temperatura alcançados para amostras de concreto com cimento CII-Z durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017...	112
Figura 62 – Limites de temperatura alcançados para amostras de concreto com cimento CPIV durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017.....	113
Figura 63 – Correlação entre a temperatura máxima alcançada com a carga passante nas amostras durante o ensaio conforme a norma ASTM C1202:2017	113
Figura 64 – Profundidade de penetração de cloreto conforme aspersão de AgNO_3 sobre as amostras de concreto recém ensaiadas conforme a norma NT BUILD 492:1999.....	115
Figura 65 – Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	116
Figura 66 – Redução no coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário em função do aumento de adição de cinza volante	117
Figura 67 – Difratoograma da amostra V-C35 de referência e após o ensaio conforme a NT BUILD 492:1999	119
Figura 68 – Difratoograma da amostra II-Z-C35 de referência e após o ensaio conforme a NT BUILD 492:1999	119
Figura 69 – Difratoograma da amostra IV-C35 de referência e após o ensaio conforme a NT BUILD 492:1999	120
Figura 70 – Comparação dos difratogramas das amostras C35 de referência e expostas ao cloreto	121
Figura 71 – MEV de amostra II-Z-C35, após ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999 (ampliação 10 kx).....	122

Figura 72 – Imagens do sal de Friedel obtidas da literatura.....	122
Figura 73 – MEV de amostra IV-C35, após ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999 (ampliação 10 kx)	123
Figura 74 – Porosidade e volume total de intrusão de mercúrio das amostras C35, de acordo com o ensaio de PIM	124
Figura 75 – Correlação entre o coeficiente de difusão do cloreto (NT BUILD 492:1999) e a carga passante (ASTM C1202:2017) nas amostras de concreto	125
Figura 76 – Temperatura máxima para amostras de concreto com cimento CPV-ARI durante o ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999	126
Figura 77 – Temperatura máxima para amostras de concreto com cimento CPII-Z durante o ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999	126
Figura 78 – Temperatura máxima para amostras de concreto com cimento CPIV durante o ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999	126
Figura 79 – Relação entre a temperatura máxima alcançada com o coeficiente de difusão do cloreto nas amostras de concreto durante o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999	127
Figura 80 – Precipitado de AgCl nas amostras prismáticas de concreto	129
Figura 81 – Profundidade e coeficiente de penetração do cloreto no concreto	129
Figura 82 – Esquema de representação da penetração de cloreto na amostra de concreto.....	131
Figura 83 – Correlação entre a sortividade e o coeficiente de penetração do cloreto em função do tipo de aglomerante	132
Figura 84 – Correlação entre o coeficiente de penetração do cloreto (AASHTO T259:1980), a carga passante e o coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	133
Figura 85 – MEV de amostra V-C35, após exposição conforme a norma AASHTO T259:1980 (ampliação 10 kx)	134
Figura 86 – Imagens de MEV do sal de Friedel obtidas da literatura	135
Figura 87 – MEV de amostra II-Z-C35, após exposição conforme AASHTO T259:1980 (ampliação: 10 kx).....	135
Figura 88 – Precipitado de AgCl nas amostras de concreto.....	136

Figura 89 – Profundidade de penetração de cloreto de amostras após exposição a solução de 16,5% de NaCl conforme a norma NT BUILD 443:1995	137
Figura 90 – Correlação entre os coeficientes de penetração do cloreto segundo as normas NT BUILD 443:1995 e AASHTO T259:1980.....	139
Figura 91 – MEV de amostra V-C35, após exposição conforme NT BUILD 443:1995 (ampliação 10 kx): (a) sal de Friedel e (b) estrutura contendo elementos aciculares.....	140
Figura 92 – MEV de amostra II-Z-C35, após exposição conforme NT BUILD 443:1995 (ampliação 10 kx)	141
Figura 93 – MEV de amostra IV-C35, após exposição conforme NT BUILD 443:1995 (ampliação 10 kx)	141
Figura 94 – EDS de amostra V-C35.....	143
Figura 95 – EDS de amostra II-Z-C35.....	143
Figura 96 – EDS de amostra IV-C35.....	144
Figura 97 – Permeabilidade das amostras referentes aos ensaios NT BUILD 492:1999 e NT BUILD 443:1995	144
Figura 98 – Porosidade das amostras referentes aos ensaios NT BUILD 492:1999 e NT BUILD 443:1995	145
Figura 99 – Distribuição dos poros do concreto após o ensaio conforme a norma NT BUILD 443:1995	146
Figura 100 – Distribuição dos poros do concreto após o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999	146
Figura 101 – Volume de intrusão de mercúrio acumulado em função da pressão nas amostras após o ensaio conforme a norma NT BUILD 443:1995	147
Figura 102 – Volume de intrusão de mercúrio acumulado em função da pressão nas amostras após o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999	147
Figura 103 – Correlação entre o coeficiente de penetração do cloreto (NT BUILD 443:1995), a carga passante e o coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	149
Figura 104 – Resumo dos resultados de penetração de cloreto para amostras contendo CPV-ARI	150
Figura 105 – Resumo dos resultados de penetração de cloreto para amostras contendo CPII-Z	151

Figura 106 – Resumo dos resultados de penetração de cloreto para amostras contendo CPIV	151
Figura 107 – Variação do custo de cada concreto em função do volume e da resistência à compressão.....	154
Figura 108 – Vida útil de estruturas expostas a uma concentração superficial de cloreto de 0,6%	155
Figura 109 – Custo do metro cúbico de concreto em função da vida útil	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de cloreto livre no interior do concreto em função do teor de C_3A do cimento.	45
Tabela 2 – Limite tolerado de cloreto admitido entre diferentes países	49
Tabela 3 – Fatores que influenciam o teor crítico de cloretos	50
Tabela 4 – Resumo dos principais métodos normatizados para avaliação da penetração do cloreto no concreto	52
Tabela 5 – Resumo da quantidade de corpos de prova de concreto moldados para o estudo, considerando três faixas de resistência para cada tipo de cimento e um mínimo de três amostras por ensaio	59
Tabela 6 – Propriedades químicas dos cimentos utilizados	61
Tabela 7 – Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos utilizados	61
Tabela 8 – Informações para dosagem do concreto	66
Tabela 9 – Quantidade de corpos de prova prevista para cada ensaio de caracterização do concreto por absorção de água.....	69
Tabela 10 – Resumo da quantidade de corpos de prova de concreto em função do método de ensaio de penetração de cloreto	73
Tabela 11 – Resumo das condições adotadas para cada ensaio	75
Tabela 12 – Referência de resistência do concreto à penetração de cloreto ...	78
Tabela 13 – Duração do ensaio e ajuste de tensão em função da corrente medida para uma tensão inicial de 30V	80
Tabela 14 – Custo unitário dos materiais utilizados para dosagem	92
Tabela 15 – ANOVA realizada a partir dos resultados de absorção por capilaridade	96
Tabela 16 – ANOVA realizada a partir dos resultados de absorção por imersão	101
Tabela 17 – ANOVA realizada a partir dos resultados da norma ASTM C1202:2017.....	109
Tabela 18 – Classificação do concreto de acordo com a profundidade de penetração de cloreto.....	111
Tabela 19 – ANOVA realizada para os resultados de coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário (NT BUILD 492:1999)	116

Tabela 20 – Resistência do concreto à penetração de cloreto em função do coeficiente de difusão no estado não estacionário	116
Tabela 21 - Classificação do concreto de acordo com o coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário.....	128
Tabela 22 – ANOVA realizada para o coeficiente de penetração de cloreto no concreto após exposição a solução de 3% de NaCl	130
Tabela 23 – Porosidade efetiva e “ink-bottle” das amostras de concreto	148
Tabela 24 – Faixas de profundidade de penetração de cloreto em função da penetrabilidade do íon proposta pela ASTM C1202:2017	152
Tabela 25 – Faixas de profundidade de penetração de cloreto em função da resistência do concreto à penetração de cloreto	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	- Área superficial
AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/a	- Relação água/aglomerante
a/c	- Relação água/cimento
A _{cap}	- Absorção de água por capilaridade
AFm	- Monossulfoaluminato
AgCl	- Cloreto de prata
AgNO ₃	- Nitrato de prata
A _{im}	- Absorção de água por imersão
Al ₂ O ₃	- Alumina ou óxido de alumínio
ANOVA	- Análise de variância
ASTM	- American Society for Testing and Materials
C	- Concentração de cloretos a uma distância x
c ₀	- Concentração de cloreto na solução catódica
C ₃ A	- Aluminato tricálcico (3CaO.Al ₂ O ₃)
C ₄ AF	- Ferroaluminato tetracálcico (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)
CaCl ₂	- Cloreto de cálcio
Ca(OH) ₂	- Portlandita ou hidróxido de cálcio
CCAA	- Cement Concrete & Aggregates Australia
c _d	- Concentração de cloreto necessária para alterar a coloração
C _{da}	- Coeficiente de difusão aparente do cloreto
C _i	- Concentração inicial de cloretos no concreto
Cl ⁻	- íon cloreto
CO ₂	- Dióxido de carbono
CP	- Corpo de prova
C _s	- Concentração de cloretos na superfície do concreto
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado

$C_{(x, t)}$	- Concentração de cloreto na profundidade x após tempo de exposição t
D	- Coeficiente de difusão do cloreto
d	- diâmetro do poro do concreto
D_a	- Coeficiente de difusão aparente do cloreto
D_e	- Coeficiente de difusão efetivo do cloreto
D_{ns}	- Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário
D_s	- Coeficiente de difusão do cloreto no estado estacionário
DRX	- Difração de raios X
EDS	- Espectroscopia por dispersão em energia
erf	- Função erro de Gauss
F	- Constante de Faraday
f_{ck}	- Resistência característica à compressão
f_{cm}	- Resistência média à compressão
$FeCl_2$	- Cloreto de ferro
Fe_2O_3	- Hematita ou óxido de ferro
I_t	- Corrente passante no tempo t
ICDD	- International Center for Diffraction Data
K	- Coeficiente de permeabilidade
L	- Espessura
M	- Mol
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
m_f	- massa final
m_i	- massa inicial
MPa	- Mega pascal
N	- Normalidade
NaCl	- Cloreto de sódio
NaOH	- Hidróxido de sódio
NT	- Nordtest
OH^-	- Hidroxila
P	- Pressão
PIM	- Porosimetria por intrusão de mercúrio

ppm	- Partes por milhão
Q	- Carga passante
R	- Constante universal dos gases
R ²	- Coeficiente de determinação
t	- Tempo
T	- Temperatura
S	- Área da superfície de exposição
SiO ₂	- Sílica ou óxido de silício
SNIC	- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
U	- Valor absoluto da tensão aplicada
UNE	- Asociación Española de Normalización
V	- Volt
V _a	- Volume da solução anódica
x _d	- Média de leituras de penetração de cloreto
z	- Valor absoluto da valência do íon
Δ	- Intervalo
x	- Profundidade de penetração do cloreto no concreto
μ	- Viscosidade
Ø	- Diâmetro
θ	- Ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro
φ	- Fator de aceleração do campo elétrico
γ	- Tensão superficial do mercúrio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1.	OBJETIVO	24
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	24
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	27
2	ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE NO CONCRETO	28
3	AÇÃO DO CLORETO EM ESTRUTURA DE CONCRETO.....	33
3.1.	MECANISMOS DE TRANSPORTE	35
3.1.1.	Absorção capilar	36
3.1.2.	Difusão.....	37
3.1.3.	Permeabilidade	38
3.1.4.	Migração	39
3.2.	PERFIL DE CLORETO	40
3.3.	TIPOS DE CLORETO NO CONCRETO	41
3.4.	TEOR CRÍTICO DE CLORETO	48
4	ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETO	51
4.1.	DETERMINAÇÃO DAS NORMAS PARA ESTUDO	53
4.2.	ESTADO DA ARTE.....	54
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	57
5.1.	MATERIAIS.....	60
5.1.1.	Cimento Portland	61
5.1.2.	Agregado miúdo.....	62
5.1.3.	Agregado graúdo	63
5.2.	PREPARO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO	64
5.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	69
5.3.1.	Absorção do concreto por capilaridade – ABNT NBR 9779:1995.....	70

5.3.2.	Absorção do concreto por imersão – ASTM C642:2013	71
5.4.	ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS	73
5.4.1.	ASTM C1202:2017	75
5.4.2.	NT BUILD 492:1999.....	79
5.4.3.	AASHTO T259:1980	82
5.4.4.	NT BUILD 443:1995.....	85
5.5.	ENSAIOS COMPLEMENTARES	87
5.5.1.	Difração de Raios X (DRX)	88
5.5.2.	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)	90
5.5.3.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	91
5.6.	ANÁLISE ECONÔMICA E DE VIDA ÚTIL	92
5.7.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	93
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
6.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	94
6.1.1.	Absorção do concreto por capilaridade.....	94
6.1.2.	Absorção do concreto por imersão	100
6.2.	ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETO	105
6.2.1.	ASTM C1202:2017	106
6.2.2.	NT BUILD 492:1999.....	114
6.2.3.	AASHTO T259:1980	128
6.2.4.	NT BUILD 443:1995.....	136
6.3.	CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS COLORIMÉTRICOS	149
6.4.	ANÁLISE ECONÔMICA E DE VIDA ÚTIL	153
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	157
	REFERÊNCIAS.....	162

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), o Brasil conta com mais de sete mil quilômetros de extensão de zona costeira. Ainda, a população brasileira se distribui de maneira irregular, devido ao processo histórico de povoamento do país, sendo mais densamente povoada na região litorânea (cerca de 25% do total de habitantes). No cenário global, a situação é similar, havendo perspectiva de que a população nessas áreas aumente ainda mais (NEUMANN, *et al.*, 2015). Por conta disso, a região litorânea abriga, também, diversos conglomerados urbanos que demandam constantemente obras de infraestrutura, muitas construídas a base de concreto. Entretanto, essa situação favorece o aumento da agressividade ambiental sobre as estruturas de concreto armado, uma vez que, além do ambiente naturalmente agressivo da zona costeira (cloreto), surge a agressividade urbana (carbonatação), representada pelo teor de dióxido de carbono presente no ambiente, variando entre 250 ppm (zona rural) até 800 ppm (zonas de elevada agressividade) (DAL MOLIN, 2011; FIGUEIREDO, 2011; DAL MOLIN *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017a).

Na região litorânea, o íon cloreto (Cl^-) é abundante e atua fortemente na degradação de estruturas de concreto armado, principalmente diminuindo sua vida útil devido à corrosão da armadura (MARSAVINA *et al.*, 2009; YUAN *et al.*, 2009). Polder *et al.* (2016) estimam um custo de reparo convencional devido a problemas com corrosão em torno de 1000 €/m², e, de maneira global, os custos envolvendo gastos diretos e indiretos com tal fenômeno excedem 1,8 trilhão de dólares em todo o mundo. Além disso, apenas com os conhecimentos existentes a respeito da tecnologia do concreto, até 25% desses custos de manutenção poderiam ser economizados anualmente (SCHMITT *et al.*, 2009). Wang *et al.* (2016) alertaram, ainda, aos riscos inerentes a vidas humanas quando a vida útil de uma estrutura de concreto armado não é atendida, sendo importante, por exemplo, o entendimento do processo de corrosão por cloreto. Ainda, de acordo com Neville (2013), projetos que considerem variáveis como o tipo de cimento, a relação

água/cimento e o adensamento podem contribuir para que a estrutura prolongue sua vida útil.

Dessa maneira, uma alternativa à melhora do desempenho de estruturas em concreto armado frente à durabilidade se dá a partir da incorporação de adições minerais (como a cinza volante) ao cimento, o que oferece maior resistência contra agentes agressivos e diminui a porosidade do material através do efeito físico de colmatação dos poros e de combinação do cloreto (GJØRV, 2015). No caso da penetração de cloreto no concreto, esta pode ser reduzida em até 30% quando, à dosagem do material, é considerado certo teor de adição de cinza volante (SØRENSEN e POULSEN, 2017). Vargas *et al.* (2011) atentam, também, à disponibilidade local de matérias-primas para a confecção de diferentes tipos de cimento, baseados em diferentes teores de adições minerais diversas. Isso se justifica pelo fato de estruturas de concreto produzidas no Brasil possuírem diferentes bases cimentícias; neste caso, pode-se citar a região Sul como exemplo de maior disponibilidade de cinza volante, uma vez que é responsável por cerca de 90% da reserva de carvão mineral do país.

Para avaliação da resistência do concreto frente à penetração de cloreto, é possível utilizar-se de normas técnicas internacionais, capazes de avaliar diferentes características do material (porosidade, coeficiente de difusão e coeficiente de migração). Os procedimentos de ensaio propostos por tais normas, no entanto, são variáveis e consideram diferentes condições do concreto (como geometria e saturação), além da concentração de cloreto na solução de exposição, da duração do ensaio e da necessidade ou não de aplicação de uma corrente elétrica externa. Tais variações resultam, portanto, em diferentes parâmetros de saída (YUAN e SANTHANAM, 2012).

Considerando os diferentes meios possíveis de verificar a qualidade de um concreto frente à exposição ao íon cloreto, mostra-se necessário garantir a eficácia dos métodos normativos de ensaio e a relação entre eles a partir da correlação de seus resultados.

1.1. OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa consiste no estudo da penetração do íon cloreto no concreto a partir da comparação de quatro principais ensaios normatizados de diferentes países: ASTM C1202:2017, NT BUILD 492:1999, AASHTO T259:1980 e NT BUILD 443:1995, de modo a verificar a possibilidade de aplicação de qualquer método de ensaio quando da investigação da resistência do concreto à penetração de cloreto.

Como objetivos específicos, este estudo pretende:

(a) avaliar a influência da cinza volante sobre as propriedades do concreto a partir da alteração do teor da adição nos cimentos comerciais – CPV-ARI, CPII-Z e CPIV (com teores aproximados de cinza volante de 0%, 12% e 27% respectivamente);

(b) verificar a exigência de uma classe mínima de resistência para o concreto armado em ambiente contendo cloreto, através da variação do traço do concreto – resistência mecânica variando entre 20 e 50 MPa para um abatimento de 60 ± 10 mm; e

(c) analisar economicamente a diferença do uso de cinza volante na dosagem do concreto bem como o ganho de vida útil em relação à resistência à penetração de cloreto.

1.2. JUSTIFICATIVA

Dentro do contexto do setor da construção civil e de geração energética, indústrias como cimenteiras e termoelétricas consomem grande energia, além dos impactos ambientais relacionados à exploração de reservas naturais e à geração de resíduos industriais. Em consequência – e como plano de fundo – está a emissão de dióxido de carbono (CO_2) inerente a esses processos. Justamente a produção do cimento Portland envolve processos que geram grande emissão de poluentes; para a produção de uma tonelada de

cimento no Brasil, por exemplo, a média de emissão esteve em torno de 570 kg de CO₂ em 2013. Em 2009, para produzir uma tonelada de clínquer – principal composto do cimento Portland – eram emitidos cerca de 545 kg de CO₂ (SNIC, 2013; SNIC, 2009).

Existem, entretanto, alternativas para diminuir a emissão de gases poluentes pela fabricação do cimento a partir do uso de adições minerais; dessa forma, a substituição parcial do clínquer por adições, como a cinza volante, é uma ação que auxilia na redução do impacto ambiental de duas maneiras: criando-se utilidade a um resíduo e diminuindo a extração de matéria-prima (DAL MOLIN, 2011). Além da questão ambiental, as adições minerais contribuem às características de concretos que as incorporam na sua dosagem, através de modificações na sua microestrutura, podendo ser benéfico, também, com relação à resistência do concreto frente à penetração de íons agressivos, como o cloreto (FIGUEIREDO, 2011; GJØRV, 2015).

De acordo com alguns estudos, as características químicas da cinza volante – teor de sílica e alumina – contribuem à qualidade do concreto em relação ao cloreto pela combinação do íon à matriz cimentícia (formando compostos mais estáveis, denominados cloroaluminato), e a partir da formação extra de gel C-S-H, o que causa o refinamento dos poros (GLASS e BUENFELD, 1997; TISBIEREK *et al.*, 2002; LIU *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017b).

A análise desses fatores a partir das normas de estudo do cloreto no concreto é realizada por alguns estudos. Yildirim *et al.* (2011), por exemplo, através da norma ASTM C1202 (2017), confirmaram o efeito da cinza volante na diminuição da permeabilidade do concreto – e consequentemente na penetração do cloreto. Entretanto, por ser um método acelerado, não considera a combinação do íon no interior do concreto, e, devido à aplicação de uma tensão externa, a temperatura da solução pode ser alterada ao longo do ensaio, favorecendo a migração do cloreto.

Os ensaios propostos pelas normas NT BUILD 492:1999 e NT BUILD 443:1995 representam, respectivamente, um ensaio acelerado e um ensaio natural para determinação do coeficiente de migração e do coeficiente de difusão do cloreto no concreto. Tanto o estudo de Jen *et al.* (2017), quanto o de

Dehghan *et al.* (2017), compararam os resultados de ensaios realizados com base nas referidas normas: para o primeiro trabalho, o efeito do tempo influenciou na capacidade de combinação do cloreto à matriz cimentícia do concreto, afirmando que o ensaio natural é mais representativo que o acelerado; para o segundo, apesar da impossibilidade de comparação direta entre os resultados dos ensaios, tanto o coeficiente de migração quanto o coeficiente de difusão apresentaram uma tendência nos resultados.

Por fim, Thomas *et al.* (2018), pelo método proposto pela norma AASHTO T259:1980, atentam à possibilidade de determinação do teor de cloreto livre e cloreto total presente na amostra de concreto, uma vez que se trata de um ensaio de difusão natural e é possível analisar a combinação do íon na matriz cimentícia. Além disso, os autores também alertaram à alteração de temperatura que ocorre no método proposto pela ASTM C1202:2017 (ensaio acelerado) e, nessa situação, a comparação com o resultado de um ensaio de exposição natural – apesar de seguir uma tendência – deve ser cuidadosa, pois parâmetros como grau de hidratação do cimento são diferentes para cada método.

Assim, considerando as peculiaridades dos diferentes métodos de análise da penetração de cloreto no concreto – além do efeito da alteração do teor de cinza volante à dosagem do material – faz-se necessário identificar as vantagens de cada procedimento, bem como a complementação entre eles (como variação da temperatura e tempo de exposição à solução contendo cloreto) e, principalmente, a possibilidade de correlação de seus resultados, de modo a justificar o uso de qualquer norma como referência para resistência do concreto frente ao cloreto. Além disso, a ausência de normativas nacionais para a análise de durabilidade do concreto frente à penetração de cloreto (entre outros) levanta a necessidade de estudos de viabilidade para a determinação de um método mais adequado à particularidade de cada local de estudo.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado a partir da revisão bibliográfica do efeito da cinza volante na dosagem do concreto exposto ao cloreto (Capítulo 2). Em seguida, trata dos conceitos e mecanismos de transporte e ação do íon cloreto no interior do concreto (Capítulo 3) e apresenta as normas previstas para ensaios (Capítulo 4) na etapa de planejamento experimental. O Capítulo 5 faz referência aos materiais utilizados para a elaboração desta pesquisa, bem como descrição dos métodos – adaptados ou não – em função das normas selecionadas. Os resultados dos ensaios e respectivas discussões estão apresentados no Capítulo 6. Finalmente, são apresentadas conclusões e perspectivas acerca do tema deste trabalho no Capítulo 7, seguido das referências utilizadas (Capítulo 8).

2 ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE NO CONCRETO

De acordo com a ABNT NBR 12653:2012 e a ASTM C125:2018, materiais pozzolânicos são materiais silicosos ou silico-aluminoso com pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, porém, quando em partículas suficientemente finas e em contato com água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) resultando em materiais com propriedades cimentantes em temperatura ambiente.

As propriedades das adições minerais possuem caráter químico ou físico; o efeito químico das adições minerais está diretamente relacionado à disponibilidade de portlandita – ou Ca(OH)_2 –, proveniente da hidratação do cimento Portland. O resultado da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, que aumenta a resistência da pasta de cimento hidratada. Com relação ao efeito físico, podem ser consideradas as seguintes características: densificação da mistura (efeito *filler*) – e consequente refinamento da estrutura dos poros (devido à formação de cristais resultantes da reação da adição nos poros) – e alteração da microestrutura na zona de transição (as adições auxiliam na redução da exsudação na região do agregado graúdo) (TISBIEREK *et al.*, 2002; DAL MOLIN, 2011; BERTOLINI *et al.*, 2013; CHOUSIDIS *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a cinza volante é um subproduto da queima de carvão em usinas termoeletricas. É constituída de finas partículas esféricas coletadas através de filtros mecânicos ou eletrostáticos. Apesar de variar sua composição com base no tipo de carvão, é composta principalmente de silicatos. Devido à sua formação em alta temperatura e rápido resfriamento, a sua estrutura microscópica é principalmente amorfa, o que a torna reativa (BERTOLINI *et al.*, 2013).

No Brasil, a cinza volante utilizada é comercializada em dois tipos de cimento, segundo a norma ABNT NBR 16697:2018 – Cimento Portland – Requisitos. A norma estabelece faixas de teores da adição permitidas para substituição do clínquer, podendo variar de 15 a 50%, para o cimento CPIV, e entre 6 e 14%, para o cimento CPII-Z. A superfície específica da cinza volante

pode variar de 300 a 700 m²/kg – similar à do cimento Portland, na faixa de 350 a 600 m²/kg. Tal adição mineral é composta, em sua maioria (85%), de sílica, alumínio, ferro, cálcio e magnésio, de morfologia tipicamente esférica, com diâmetro da ordem de até 150 µm (DAL MOLIN, 2011).

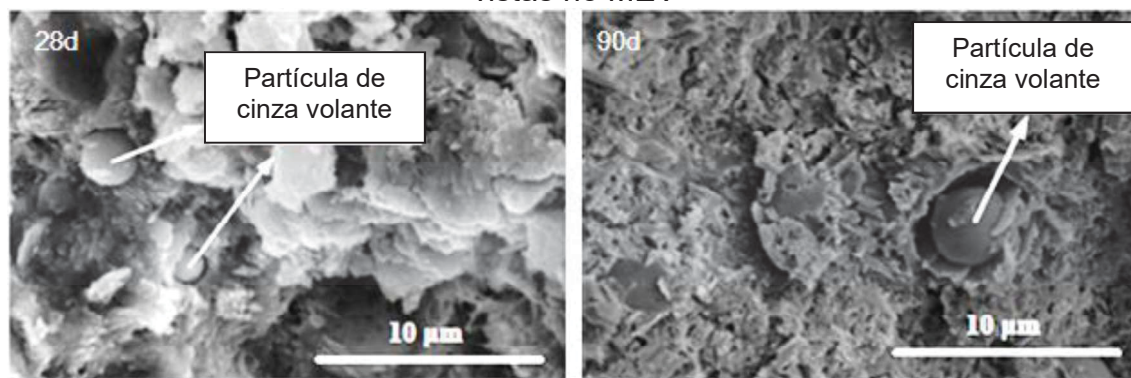
A maior concentração de alumina (Al₂O₃) e sílica (SiO₂) em relação ao cimento Portland sem adição é responsável pelo efeito benéfico da adição de cinza volante na dosagem do concreto, em se tratando de refinamento dos poros e aumento da resistência à penetração de agentes agressivos. Assim como a alumina reage com o cloreto para formação de sal de Friedel e sal de Kuzel (cujas equações serão exibidas no capítulo 3), a sílica reage com a portlandita, gerando quantidade extra de C-S-H (LIU *et al.*, 2016).

Para determinação da atividade pozolânica da adição mineral no cimento, a norma brasileira ABNT NBR 15895:2010 apresenta os procedimentos para ensaio. Em suma, o resultado traz a capacidade da adição pozolânica em fixar cal para a formação de compostos hidratados. Através do consumo da cal em mistura com a pozolana e água, a uma temperatura de 90 ± 5 °C, verifica-se o potencial reativo da adição. Além disso, a norma ABNT NBR 5752:2014 apresenta como resultado o índice de atividade pozolânica de amostras da adição misturadas ao cimento Portland. O resultado de um ensaio de ruptura à compressão de uma amostra de argamassa aos 28 dias é comparado a uma argamassa de referência, indicando ou não a pozolanicidade da adição.

Segundo Dal Molin (2011), a adição mineral no concreto afeta propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido. Com relação à coesão, a cinza volante (com massa específica entre 1900 e 2400 kg/m³, em comparação com a do cimento Portland, em torno de 3150 kg/m³) altera o volume de pasta, aumentando a plasticidade e a coesão. Isso contribui à diminuição da segregação e exsudação no concreto, parâmetros de importante controle durante a execução de obras em concreto. Em relação à trabalhabilidade, o formato esférico das partículas da cinza volante, bem como sua superfície eletricamente carregada (o que causa dispersão das partículas de cimento), permitem reduzir o consumo de água na produção de concreto. Liu *et al.* (2017c) apresentam, a partir da Figura 1, uma representação da cinza

volante num concreto contendo 30% da adição, curados em duas idades distintas.

Figura 1 – Partículas de cinza volante em concreto com 28 e 90 dias de cura vistas no MEV



Fonte: Traduzido de Liu *et al.* (2017c)

Para o concreto no estado endurecido, a resistência à compressão é influenciada a partir de idades mais avançadas, consequência da densificação do concreto e efeito fíler. Isso torna o uso da cinza volante comum em concreto exposto ao ambiente marinho. No entanto, a melhora nas características físicas do concreto demora a se consolidar (6 a 12 meses), o que torna o material com baixa resistência a agentes agressivos em baixas idades (SØRENSEN e POULSEN, 2017). Segundo Dal Molin (2011), a resistência final do concreto com adição depende da quantidade e característica da adição (teor de SiO_2 em forma amorfa, tamanho das partículas) e das condições de cura. Liu *et al.* (2017c) chamam atenção à importância da cura de concretos produzidos com cinza volante, de modo a garantir a produção de C-S-H extra e, consequentemente, o refinamento dos poros e a resistência à penetração de agentes agressivos. Na literatura, é possível confirmar o efeito da adição de cinza volante no concreto sobre a resistência à compressão (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2017c; THOMAS *et al.*, 2018).

Com relação à suscetibilidade do concreto frente à penetração de íons cloreto, Tisbieriek *et al.* (2002) analisaram a influência do tipo de cimento na composição de corpos de prova de concreto como método de aumento da durabilidade. Em experimento realizado com cimentos tipo CPIV e CPV, ambos expostos a duas soluções com concentrações diferentes de cloreto, foram

coletadas amostras dos corpos de prova em diferentes profundidades. Por conter maior teor de adição que o CPV, o cimento CPIV (pozolânico) tem maior capacidade de fixação de cloretos, o que dificulta que os íons se difundam para o interior dos poros do concreto. Ainda, a densificação microestrutural do cimento pozolânico refina o tamanho dos poros e a interconectividade entre eles, criando maior resistência à difusão de agentes agressores. Desta forma, a concentração de íons do elemento se mostrou inferior para os corpos de prova moldados com CPIV.

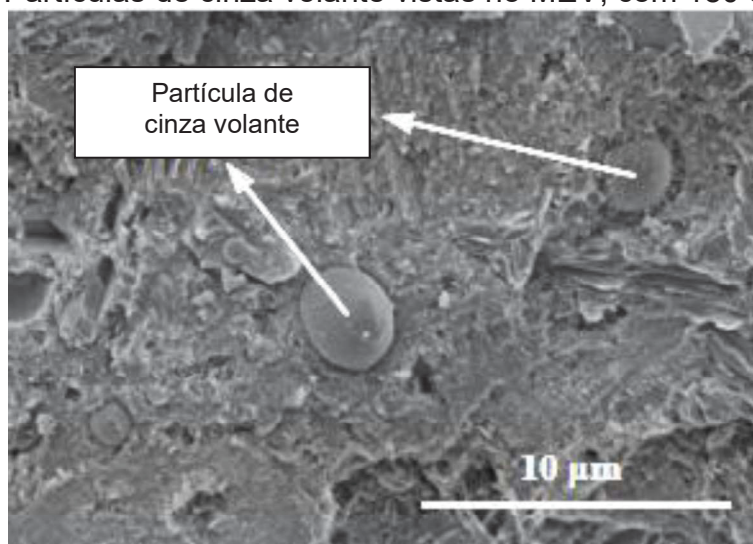
Liu *et al.* (2016), Moffatt *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2017c) atentam à maior quantidade de alumina disponibilizada pela cinza volante para combinação do cloreto e redução do íon livre a profundidades maiores no concreto. Liu *et al.* (2016) apresenta um aumento da capacidade de combinação do cloreto no interior do concreto em função de um aumento no teor de cinza volante (de 0% para 15% e 30%). Moffatt *et al.* (2017), a partir da análise da penetração de cloreto em amostras em laboratório com o auxílio de aplicação de corrente elétrica e em amostras expostas a ambiente marinho, concluíram que, mesmo concretos com elevado volume de cinza volante (entre 56 e 58%) apresentam alta resistência à penetração do íon. Ao analisar o efeito do tempo de cura de amostras de concreto contendo cinza volante, Liu *et al.* (2017c) encontrou uma diminuição no coeficiente de migração de cloreto para idades mais avançadas, sendo mais significativa ao comparar tal parâmetro entre 28 e 91 dias do que entre 91 e 180 dias. Isso sugere que, aos 90 dias, as reações pozolânicas são suficientes e quase completas.

Por fim, as características do concreto desenvolvidas a partir dos efeitos benéficos das adições minerais refletem diretamente na durabilidade da estrutura como um todo. A porosidade capilar é reduzida devido aos compostos precipitados proveniente das reações das adições nos vazios da pasta de cimento endurecida, além de atuar como principal característica de controle aos mecanismos de transporte no interior do concreto (SILVA, 2011; GJØRV, 2015). Rabehi *et al.* (2013), por exemplo, relacionaram a absorção capilar ao tempo de cura – este influenciando sobre a porosidade do material – para cimentos com adição de cinza volante. A redução da absorção capilar chegou a

63% para concretos curados durante 28 dias em comparação com o mesmo concreto, sem cura.

Além disso, a substituição do hidróxido de cálcio – composto solúvel e lixiviável – por um composto mais resistente (C-S-H) auxilia na capacidade do material em dificultar que a água circule no seu interior, consequentemente dificultando o transporte de íons agressivo, por exemplo. Em comparação à Figura 1, na Figura 2 (mesmo amostra de estudo) é possível verificar uma matriz cimentícia mais densa, devido à idade de cura do material (DAL MOLIN, 2011; LIU *et al.*, 2017c).

Figura 2 – Partículas de cinza volante vistas no MEV, com 180 dias de cura



Fonte: Traduzido de Liu *et al.* (2017c)

Apesar de diversos estudos confirmarem o efeito benéfico de outras adições, como a escória de alto forno, por exemplo, sobre a resistência do concreto à penetração de cloretos (DIVSHOLI *et al.*, 2014; GJØRV, 2015), este estudo tem como base a adição de cinza volante. Isso é justificado pelo fato de a região sul do Brasil possuir aproximadamente 90% da reserva de carvão mineral do país, gerando em torno de dois milhões de toneladas de cinza volante anualmente. Isso faz com que o cimento pozolânico seja mais consumido e comercializado na região, propondo um estudo em torno deste material (VARGAS *et al.*, 2011).

3 AÇÃO DO CLORETO EM ESTRUTURA DE CONCRETO

O cloreto presente em estruturas de concreto armado contaminadas pode ser proveniente de diversas fontes e ao longo de diferentes etapas da vida útil do material: na fase de produção do concreto (aceleradores de pega, agregados e/ou água de amassamento contaminados), na fase de manutenção (sais de degelo) ou devido à ação ambiental do meio onde se encontra a estrutura (atmosfera marinha, em contato direto com água do mar ou exposto a produtos agressivos em ambientes industriais) (DAL MOLIN, 2011; FIGUEIREDO, 2011).

Experiências em região costeira e em alto mar, relatadas por GjØrv (2015), expõem a fragilidade das estruturas de concreto armado em relação à resistência à penetração de cloretos, sendo uma questão de tempo até que uma quantidade prejudicial atinja a armadura – isso mesmo quando de concretos produzidos com alta qualidade.

A alta velocidade de ataque do cloreto à armadura é um dos fatores que tornam o ambiente marinho altamente prejudicial às estruturas de concreto armado. Neste ambiente, podem ocorrer manifestações patológicas simultâneas devido a fatores internos ou externos e de diferentes origens – química, física e biológica (LIMA, 2011; NEVILLE, 2013).

Dentro do contexto da região litorânea, pode-se considerar zonas de contato com a água do mar que refletem diferentes graus de agressividade às estruturas em concreto armado: as normas brasileira (ABNT NBR 6118:2014), europeia (EN 206:2013) e australiana (AS 3600:2009) também consideram tais microclimas a fim de obter um projeto mais preciso. Dal Molin (2011) descreve as referidas zonas:

- a) Zona de atmosfera marinha: região que recebe uma considerável quantidade de sais devido a, principalmente, íons presentes na atmosfera ou dissolvidos na umidade do ar. A concentração de sais na superfície das estruturas diminui conforme se aumenta a distância do

mar e, conseqüentemente, torna-se dependente de fatores como velocidade e direção dos ventos;

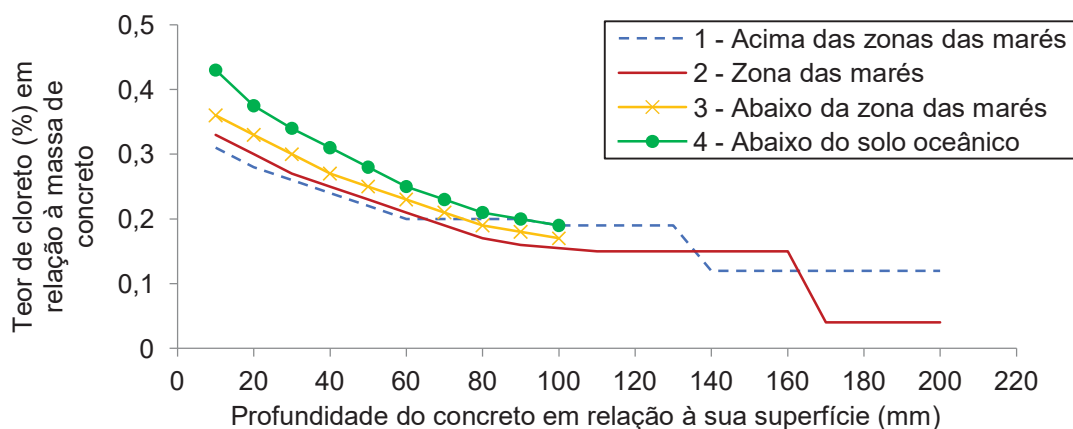
b) Zona de respingo: ação direta do mar sobre a estrutura, evidenciando ciclo de molhagem e secagem do concreto que potencializa o ingresso do cloreto. A corrosão das armaduras é bastante significativa devido à elevada concentração do íon;

c) Zona de variação de marés: limite de altura alcançada pela maré. Caso a estrutura de concreto esteja permanentemente saturada, ocorre um aumento na concentração de sais no interior do material (ação simultânea de diversos mecanismos de transporte). Nesta situação, além da degradação química, é comum a evidência de degradação física (ação das ondas) e até biológica (presença de microrganismos);

d) Zona submersa: estrutura permanece constantemente submersa, predominando a ação de sais agressivos e de microrganismos.

Nesse contexto, GjØrv (2015) apresenta, a partir da Figura 3, um gráfico de como varia a deposição do cloreto ao longo da profundidade do concreto em função das quatro zonas descritas, a fim de identificar a profundidade de alcance de uma concentração considerada crítica do íon em relação à massa de concreto.

Figura 3 – Concentração de cloretos no interior do concreto em função da proximidade da estrutura com o mar



Fonte: Adaptado de GjØrv (2015)

Balestra *et al.* (2019a), estudando estruturas reais em concreto armado expostas ao cloreto por mais de 40 anos, mostrou que nas regiões de maré e de respingos foram encontrados os maiores picos do íon, em profundidades de até cinco centímetros. A zona de maré foi considerada a mais agressiva ao concreto, devido a, principalmente o efeito das ondas e dos ciclos de molhagem e secagem, que auxiliam no transporte do cloreto para o interior do material. Apesar da influência da posição da estrutura, Balestra *et al.* (2019) concluíram que a influência da direção predominante do vento foi um fator de grande influência sobre a concentração de cloreto no concreto. Mesmo em estruturas localizadas em até dez metros acima do mar, a concentração do íon foi similar ao perfil encontrado nas estruturas situadas na zona de maré.

3.1. MECANISMOS DE TRANSPORTE

De acordo com Silva (2011), existem fatores intrínsecos e extrínsecos ao concreto que influenciam nos mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do material. Com relação aos fatores intrínsecos, pode-se considerar parâmetros como dimensão dos poros, zona de transição, espessura de cobrimento, condição de cura (e grau de hidratação do cimento) e presença de adições no cimento. Consequentemente, características como relação água/cimento (a/c) e sua relação com a porosidade estão intimamente ligados aos mecanismos de transporte. Referente aos fatores extrínsecos, pode-se citar o tipo e a concentração das substâncias no ambiente em contato com o concreto, as condições de uso da estrutura e as microfissuras. Ainda, parâmetros como temperatura, umidade relativa e grau de carbonatação também influenciam nos mecanismos de transporte.

O cloreto pode ingressar no interior dos poros do concreto de diferentes maneiras, descritas nos próximos tópicos.

3.1.1. Absorção capilar

A absorção capilar representa uma característica de materiais porosos, que absorve líquidos devido às forças de atração de moléculas pela superfície dos poros, e depende de características como tensão superficial, viscosidade e densidade do material absorvido e da estrutura do poro – diâmetro, tortuosidade e continuidade (YUAN e SANTHANAM, 2012).

Esse mecanismo de transporte pode auxiliar no ingresso do cloreto para o interior do concreto, limitado a baixas profundidades, considerando-se o íon dissolvido em líquido (geralmente água). Nesse caso, a penetração do íon dificilmente supera o cobrimento da armadura, porém a velocidade de ingresso do cloreto por absorção capilar ocorre de maneira mais rápida que por outros mecanismos de transporte, o que reduz a distância necessária para atingir o aço no interior do concreto. (CASCUDO, 1997; YUAN e SANTHANAM, 2012; BERTOLINI *et al.*, 2013).

Se o concreto não está em contato permanente com um líquido (situação em zona de maré, por exemplo), o transporte do cloreto se dá em regime não estacionário. Entretanto, existem situações em que o mecanismo de transporte pode atuar num regime estacionário, quando uma face do concreto está em contato direto com água e a face oposta está sujeita a evaporação. A situação de equilíbrio manteria a absorção capilar constante nessa seção de concreto. Além disso, a condição estacionária de transporte de cloreto no concreto é alcançada quando se esgota a capacidade de fixação do íon à matriz cimentícia do material, considerando, apenas, o fluxo do íon livre. (CCAA, 2009; CHEEWAKET *et al.*, 2010).

Segundo GjØrv (2015), a penetração de cloretos no concreto por absorção capilar ou difusão ocorre em concretos sem fissuras. Entretanto, estruturas de concreto em ambientes de agressividade ambiental severa estão, muitas vezes, expostos a elevados teores de umidade. Tais teores podem ser elevados inclusive na região de cobrimento da armadura, e, neste caso, o mecanismo de difusão iônica se torna comum como meio de transporte do cloreto para o interior do concreto.

3.1.2. Difusão

A difusão iônica é o transporte de íons devido a uma diferença de concentração entre dois meios. Apesar de concretos saturados apresentarem uma dificuldade maior à penetração de gases, a mesma condição facilita a difusão do cloreto. Nessa condição, a difusão é o principal meio de ingresso do íon no concreto. O coeficiente de difusão do cloreto pode ser utilizado como principal fator para representar a velocidade de penetração do íon no concreto (CASCUDO, 1997; BERTOLINI *et al.*, 2013).

Para Yuan e Santhanam (2012), em estruturas reais, o mecanismo de difusão raramente atinge o estado estacionário no concreto; isso se deve ao fato de a microestrutura do concreto continuar evoluindo com a idade, o que torna a difusão um processo dependente do tempo. Para tanto, através da segunda Lei de Fick é possível considerar a mudança da difusão por unidade de tempo através da mudança do fluxo por unidade de profundidade. A formulação para estimar a profundidade de penetração do cloreto no interior do concreto, governada pela lei, é apresentada na Equação 1.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde C é a concentração do íon na distância x , t é o tempo de exposição e D representa o coeficiente de difusão. Algumas simplificações são consideradas, como o concreto sendo um material homogêneo (coeficiente de difusão não varia ao longo da espessura de cobrimento do concreto) e a deposição de sal na superfície das estruturas sendo igual ao longo da sazonalidade ambiental anual (concentração de íon na superfície é constante). Para tal situação, pode-se adotar a solução proposta na Equação 2.

$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{D \cdot t}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Sendo C_s a concentração de cloretos na superfície do concreto e *erf* a função erro de Gauss. A curva ajustada da solução da Equação 2 fornece o perfil de cloretos do concreto (concentração do íon em função da profundidade de penetração no material, similar à Figura 3).

A consideração do coeficiente de difusão do cloreto, no entanto, não é simples. A variação do coeficiente de difusão do cloreto devido à interação química é uma importante análise a ser levada em consideração. A partir da capacidade de combinação do íon com os produtos da matriz cimentícia (fases aluminato C_3A e C_4AF), o real ingresso de cloreto no concreto pode ser modificado. Entre as principais razões para este fato, podem ser mencionados o grau de hidratação dos materiais aglomerantes – e o consequente refinamento dos poros do concreto com a formação de C-S-H – e a maior disponibilidade de aluminatos (SURYAVANSHI *et al.*, 1995; CHEEWAKET *et al.*, 2010; CHOUSIDIS *et al.*, 2016). Enquanto tal combinação entre os elementos não se esgota, o processo de difusão torna-se mais lento. Quando a combinação do cloreto no concreto não é considerada, o coeficiente de difusão aparente (D_a) é obtido (penetração de cloretos livres, dissolvidos em água); nessa situação, o D_a também é denominado coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s). Em contrapartida, quando o coeficiente de difusão do cloreto é medido a partir da concentração de cloretos totais, isto é, o cloreto combinado e o cloreto livre, solúveis em ácido, considera-se o coeficiente de difusão efetivo (D_e), ou coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) (CCAA, 2009; APONTE *et al.*, 2012).

3.1.3. Permeabilidade

A permeabilidade é a medida de fluxo de líquidos ou gases através de um material poroso devido a um gradiente de pressão. Em amostras saturadas, a água flui nos poros sob pressão hidráulica podendo ser descrita pela Lei de Darcy, apresentada na Equação 3.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{L \cdot \mu} \quad \text{Equação 3}$$

Onde $\frac{\partial q}{\partial t}$ representa o fluxo do líquido, K é o coeficiente de permeabilidade, ΔP é a diferença de pressão, μ é a viscosidade do líquido, A é

a área da superfície e L é a espessura do material (YUAN e SANTHANAM, 2012; BERTOLINI *et al.*, 2013)

O coeficiente de permeabilidade é menor conforme a relação água/cimento diminui e o processo de hidratação da pasta de cimento avança. A permeabilidade do concreto, assim como a absorção por capilaridade, depende de fatores como estrutura do poro, características do líquido e condições ambientais, sendo um mecanismo de transporte que ocorre em estruturas em contato com líquido sob pressão. O cloreto penetra, neste caso, no concreto, dissolvido na água que permeia o material. O coeficiente de permeabilidade é uma característica do material e pode ser determinado através de um fluxo em amostra saturada (estado estacionário), sendo expresso em unidades de volume por unidade de área e unidade de tempo. De modo geral, a permeabilidade do concreto varia entre 10^{-16} e 10^{-10} m/s (CASCUDO, 1997; CCAA, 2009; YUAN e SANTHANAM, 2012).

3.1.4. Migração

Migração iônica é o transporte de íons em solução a partir da aplicação de um campo elétrico. A velocidade de ingresso do íon a partir de um material é função da corrente passante e do tamanho do íon (BERTOLINI *et al.*, 2013, CASCUDO, 1997).

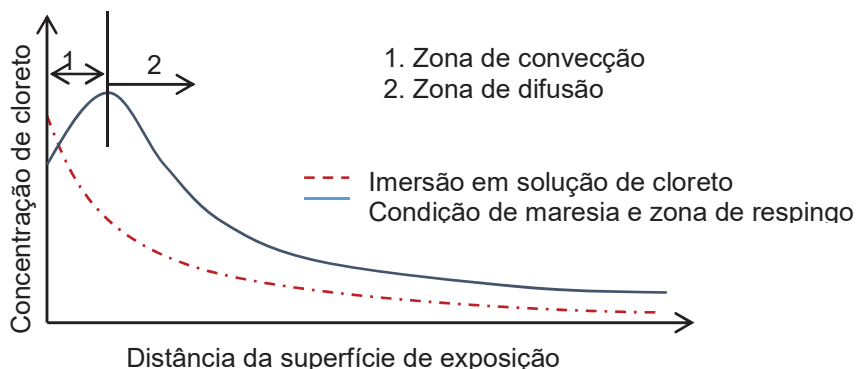
A diferença na polaridade entre dois meios, que ocorre devido ao campo elétrico, provoca uma movimentação iônica em direção à região de carga eletronegativa oposta ao do íon. Nessa configuração, os íons movem-se atraídos pelo eletrodo de carga inversa e pode ocorrer de maneira acidental (fuga de corrente) ou de maneira proposital (técnicas de reabilitação do concreto). O íon cloreto possui carga elétrica negativa, o que contribui para sua movimentação quando excitado por um campo elétrico. Em estruturas de concreto armado, o campo elétrico pode ser gerado pela corrente elétrica do próprio processo eletroquímico de corrosão. No caso de ensaios em laboratório, é possível determinar a resistência do concreto à penetração do

cloreto a partir da corrente aplicada num sistema contendo uma amostra do material, como nos métodos propostos pelas normas ASTM C1202:2017, NT BUILD 492:1999 e UNE 83987:2012 (CCAA, 2009; YUAN e SANTHANAM, 2012).

3.2. PERFIL DE CLORETO

O perfil de cloreto representa a concentração do íon em determinada profundidade no concreto. De acordo com Liu *et al.* (2017b) e Liu *et al.* (2016), o concreto exposto em ambiente contendo o íon apresenta um pico na concentração em pequena profundidade no concreto (0 a 3 mm) – denominada zona de convecção –, enquanto amostras de concreto ensaiadas por imersão em solução de cloreto apresentam a maior concentração na superfície do material. Estas zonas são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática do perfil de cloretos no interior do concreto



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2017b)

O pico da concentração na zona de convecção é justificado devido à ação da absorção por capilaridade combinada ao processo de difusão. A maresia deposita o cloreto sobre a superfície do concreto (absorvido por capilaridade) e, a partir daí, o íon livre penetra no interior do concreto devido à diferença de concentração (difusão). Quando ocorre o período de secagem

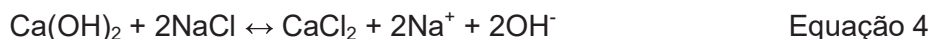
(recorrente em zonas de respingo), as moléculas de água evaporam e o cloreto se acumula na zona de convecção. Assim, após uma série de ciclos de molhagem e secagem, a concentração do íon alcança um pico em pequenas profundidades no interior do concreto. Quando o concreto é imerso em solução, o transporte do íon segue a segunda Lei de Fick (Equação 1) (LIU *et al.*, 2017b).

A segunda Lei de Fick, entretanto, não representa de maneira precisa o comportamento real do perfil de cloreto no concreto, como o modelo apresentado na Figura 4. Nesse sentido, Balestra *et al.* (2019b) apresentou uma possibilidade de modelar, inclusive, a zona de convecção do perfil, a partir da alteração da equação de Holliday, apresentando uma representação significativa do padrão apresentado por Liu *et al.* (2017b) independentemente da região de agressividade e da idade da estrutura. A modelagem do perfil de cloreto do estudo de Balestra *et al.* (2019b), analisando uma estrutura com idade média de 50 anos, apresentou boa correlação com os dados reais, principalmente na zona de difusão e identificando a alteração do perfil na zona de convecção em uma profundidade entre 5 e 10 mm, similar ao exposto, também, por Liu *et al.* (2017b). De maneira geral, tanto o cloreto livre quanto o cloreto combinado (bem como o cloreto total) apresentam um padrão de perfil.

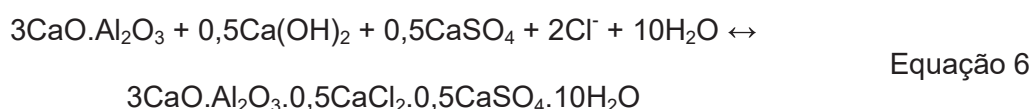
3.3. TIPOS DE CLORETO NO CONCRETO

No interior do concreto, o cloreto pode ser encontrado basicamente em três formas: combinados quimicamente com as fases aluminato do cimento, adsorvidos na superfície dos poros ou livres na solução dos poros. O íon adsorvido está fisicamente aderido às partículas de cimento e agregado, podendo ser liberado em ciclos de molhagem e secagem, dissolvidos na água. Os cloretos livres fazem referência ao íon não combinado no interior do concreto, sendo passível de maior preocupação, devido à possibilidade de ligação aos átomos de ferro da armadura da estrutura. O cloreto combinado surge devido à interação com os produtos da hidratação do cimento, resultando num composto de maior estabilidade (cloroaluminato ou cloro-sulfoaluminato).

Desta maneira, o cloreto total representa o somatório entre o cloreto livre e o cloreto combinado. O cloroaluminato se apresenta na forma de sal de Friedel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e sua formação é representada na Equação 4 e na Equação 5 (LANNEGRAN *et al.*, 2001; YUAN e SANTHANAM, 2009; FIGUEIREDO, 2011; LIU *et al.* 2017b).



A presença de cloreto no interior do concreto auxilia, ainda, na formação do cloro-sulfoaluminato ou sal de Kuzel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,5\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{CaCl}_2 \cdot 10-12 \cdot \text{H}_2\text{O}$). A formação do sal de Kuzel é representada na Equação 6 (HIRAO *et al.*, 2005; THOMAS *et al.*, 2012; WEERDT *et al.*, 2014).



Ma *et al.* (2018), a partir de análise por difração de raios X, apresentou os picos referentes à formação de sal de Friedel (FS) e sal de Kuzel (KS) em amostras contendo cinza volante com (C-PFA) e sem (C-UFA) pré tratamento em solução alcalina (Figura 5).

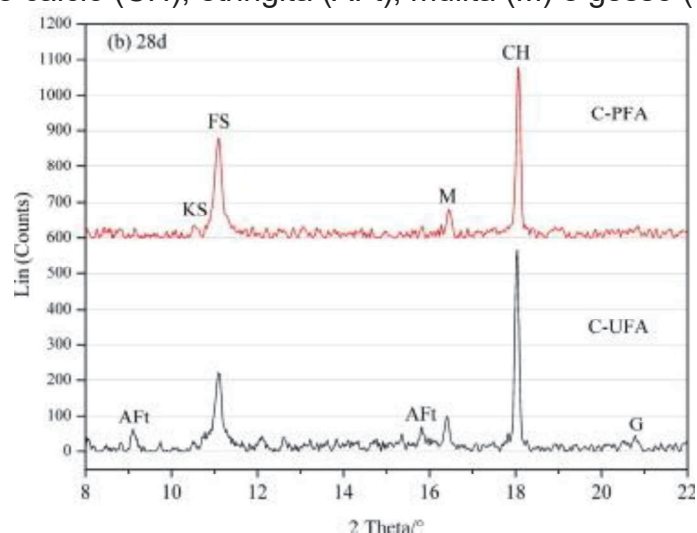
Zhang *et al.* (2011) apresentam a morfologia do sal de Friedel através da Figura 6, identificado como sendo uma estrutura cristalina hexagonal, sobreposta e com a formação de outros componentes amorfos. Na Figura 7, Kopecký (2006) complementa a identificação do cloroaluminato, apresentando os cristais hexagonais planos misturados a etringita.

Ma *et al.* (2018) apresentaram, também, imagens do sal de Friedel através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de concreto em duas idades (3 e 28 dias). Na Figura 8 e na Figura 9 é possível verificar o sistema hexagonal e “escamoso”, em lâminas, representando o cloroaluminato, diferente dos cristais de portlandita, que são mais largos e espessos.

Para Liu *et al.* (2017a), o cloreto combinado não deixa de ser uma ameaça à durabilidade de estruturas de concreto armado, uma vez que está

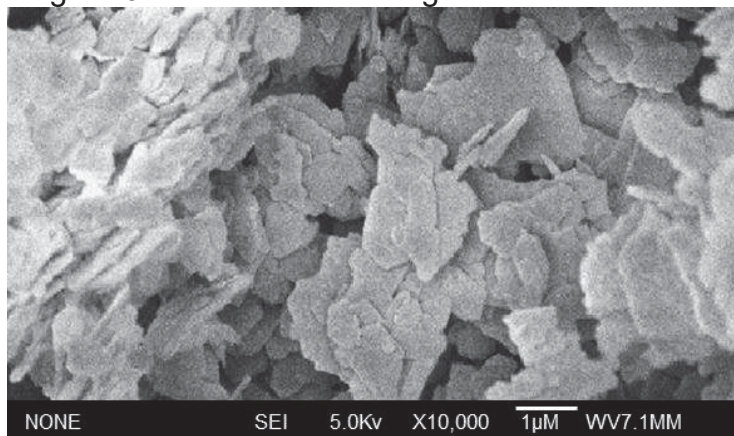
presente no interior do concreto na forma de sal de Friedel ou sal de Kuzel, podendo perder sua estabilidade frente à alteração do pH do concreto devido a fatores como a carbonatação. Quando isso ocorre, o cloreto combinado se torna livre, aumentando sua concentração no interior do concreto. Sørensen e Poulsen (2017) completam que a carbonatação reduz drasticamente a capacidade de ligação do cloreto, justificado pela maior concentração do íon livre em camadas mais externas do concreto, que são mais suscetíveis à reação com o CO_2 .

Figura 5 – Difratoograma de amostra de concreto contendo cinza volante mostrando picos referentes ao sal de Friedel (FS), sal de Kuzel (KS), hidróxido de cálcio (CH), etringita (AFt), mulita (M) e gesso (G)



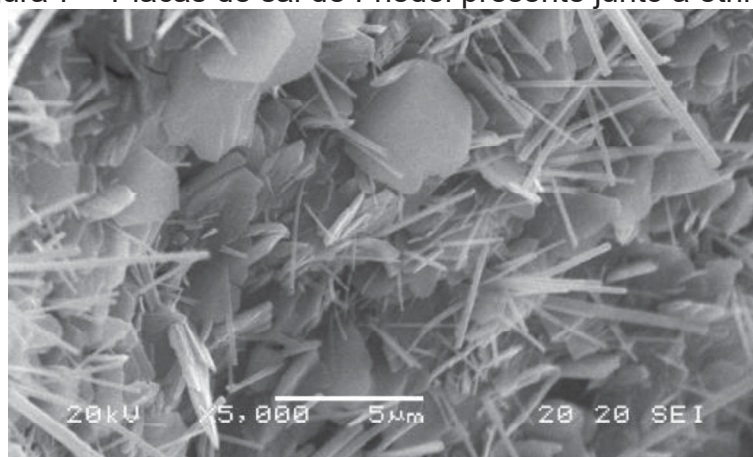
Fonte: Ma *et al.* (2018)

Figura 6 – Estrutura morfológica do sal de Friedel



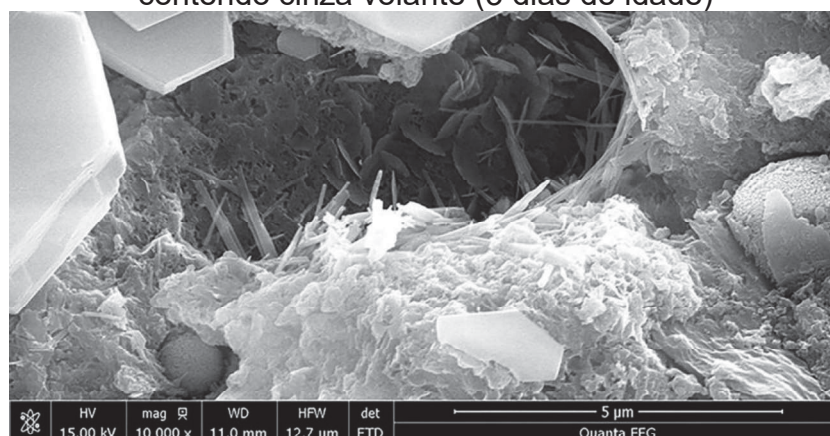
Fonte: Zhang *et al.* (2011)

Figura 7 – Placas de sal de Friedel presente junto à etringita



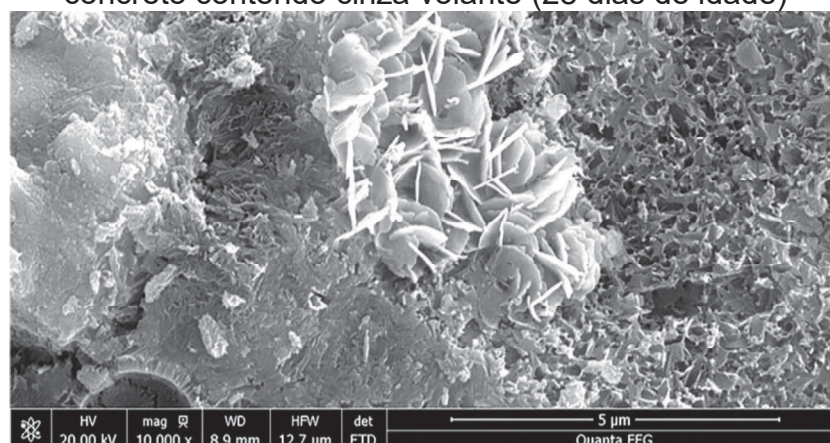
Fonte: Kopecskó (2006)

Figura 8 – Sal de Friedel (estrutura hexagonal) visível em amostra de concreto contendo cinza volante (3 dias de idade)



Fonte: Ma *et al.* (2018)

Figura 9 – Sistema hexagonal “escamoso” do sal de Friedel, em amostra de concreto contendo cinza volante (28 dias de idade)



Fonte: Ma *et al.* (2018)

Conforme o cloreto penetra no concreto, para que ele atinja a armadura na forma livre, são levados em considerações diversos fatores, como concentração do íon no ambiente, tipo e consumo de aglomerante, condição de cura do concreto, relação água/cimento, grau de carbonatação, presença de outro ânion (sulfato, por exemplo), temperatura, umidade relativa e grau de saturação do material. Tais fatores servem como análise para verificar o tempo necessário para o cloreto atingir o cobrimento da armadura (GJØRV, 2015; FIGUEIREDO, 2011; YUAN e SANTHANAM, 2009).

Para Page *et al.* (1986), a maior concentração de sal de Friedel resulta numa menor quantidade de cloreto livre na solução dos poros do concreto. Segundo os autores, cimento com baixo teor de C_3A possui baixa capacidade de neutralização do íon. Tal informação é confirmada por Rasheeduzzafar *et al.* (1990), que compararam o teor do aluminato tricálcico do cimento com a quantidade de cloreto livre nos poros do concreto e, conseqüentemente, o ganho de tempo para o início da corrosão. Tal relação é apresentada na Tabela 1, onde a relação de cloreto livre na solução dos poros é inversamente proporcional à quantidade de C_3A presente no cimento.

Tabela 1 – Quantidade de cloreto livre no interior do concreto em função do teor de C_3A do cimento.

Teor de C_3A (%)	% cloreto livre	Ganho de tempo para iniciar a corrosão
2	86	Referência
9	58	1,75 x
11	51	1,93 x
14	33	2,45 x

Fonte: Adaptado de Rasheeduzzafar *et al.* (1990)

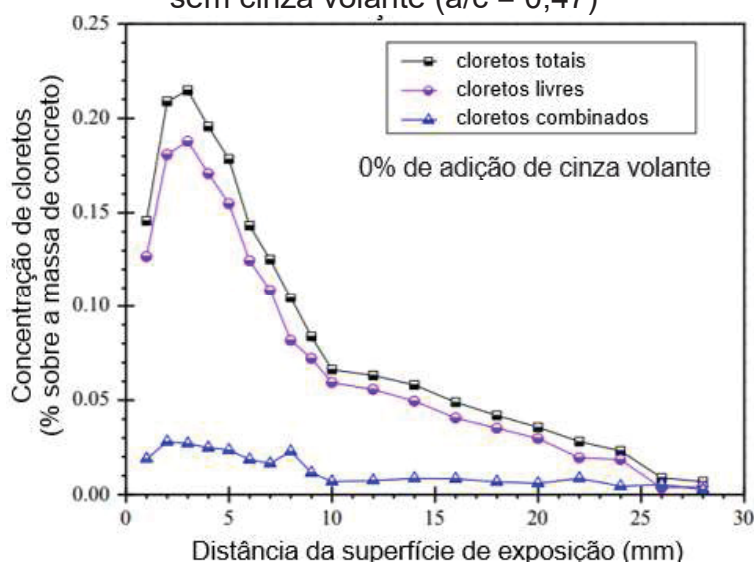
Yuan *et al.* (2009) apontaram alguns benefícios do cloreto combinado no interior do concreto, como retardamento da difusão de cloreto livre no interior do concreto e a própria formação de sais de Friedel, o que colmataria os poros do material, dificultando o ingresso de novos agentes agressivos. Este último fato também é mencionado por Liu *et al.* (2017a).

No entanto, para efeito de análise de durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado, e devido à sua característica porosa, Yuan *et al.* (2009) atentam para a consideração da análise do teor de cloretos totais

(livres e combinados) ao invés de apenas cloretos livres, assim como também foi concluído por Liu *et al.* (2017a). Para tal determinação, de acordo com Figueiredo (2011), o teor de cloretos livres é expresso em porcentagem de cloretos solúveis em água, enquanto que o teor de cloretos totais se dá em função do íon solúvel em ácido (ambos em relação à massa de cimento).

A capacidade de combinação do cloreto à matriz cimentícia pode ser melhor visualizada na Figura 10, na Figura 11 e na Figura 12, que representam, respectivamente, amostras de concreto contendo 0, 15 e 30% de cinza volante. Das imagens, é visível que, independentemente do tipo de análise do íon (total, livre ou combinado), o perfil de cloreto em função da profundidade do concreto é semelhante.

Figura 10 – Perfil de cloretos totais, livre e combinados de amostra de concreto sem cinza volante ($a/c = 0,47$)

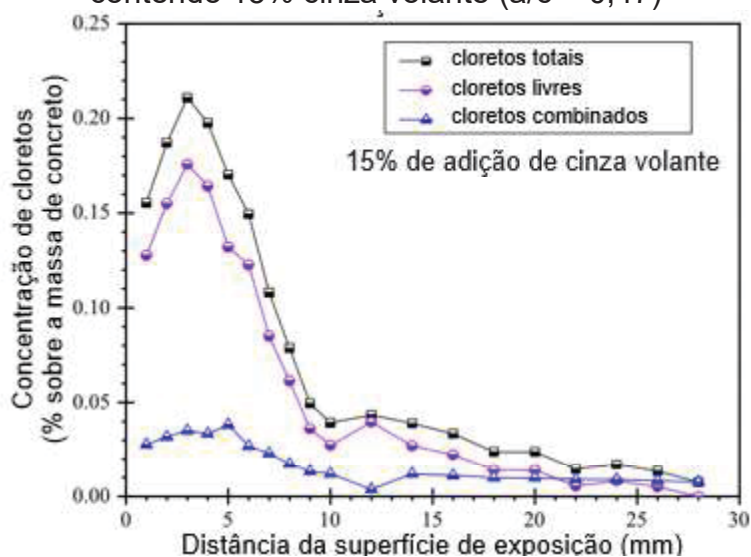


Fonte: Traduzido de Liu *et al.* (2017b)

Além disso, a partir dos dados de dosagem (relação a/c e teor de cinza volante), é possível inferir a respeito da capacidade de combinação do cloreto no concreto. Segundo Luping *et al.* (2012), tanto o aumento na relação água/cimento quanto o aumento no teor da adição contribuem para elevar o teor de cloreto combinado. Os autores relacionam a hidratação do cimento – e consequente formação de C-S-H – à formação de C_3A , o que favorece a combinação do íon. Paralelamente, cimentos contendo cinza volante possuem

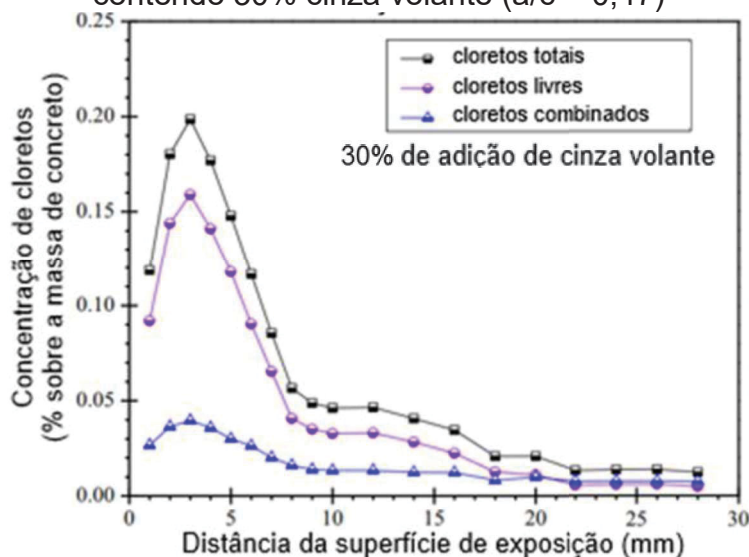
maior teor de aluminatos, contribuindo para uma maior taxa de formação de sal de Friedel (SURYAVANSHI *et al.*, 1995; CHEEWAKET *et al.*, 2010; GJØRV, 2015). De acordo com Liu *et al.* (2017b), a capacidade de combinação do cloreto em um concreto contendo 15% de cinza volante aumentou em 30,7% em relação a um concreto sem adição, enquanto que para um concreto contendo 30% da adição esse aumento foi de 61,5%.

Figura 11 – Perfil de cloretos totais, livre e combinados de amostra de concreto contendo 15% cinza volante ($a/c = 0,47$)



Fonte: Traduzido de Liu *et al.* (2017b)

Figura 12 – Perfil de cloretos totais, livre e combinados de amostra de concreto contendo 30% cinza volante ($a/c = 0,47$)



Fonte: Traduzido de Liu *et al.* (2017b)

Apesar da importância em determinar a quantidade de cloretos totais no interior do concreto, é possível encontrar na literatura uma relação linear entre a concentração de cloretos livres e totais para concretos com adição de cinza volante, com coeficiente de determinação R^2 em torno de 0,99 (LIU *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017,b).

3.4. TEOR CRÍTICO DE CLORETO

O processo de corrosão, segundo o modelo adaptado de Tuutti (1982), pode ser dividido em três etapas: a primeira é referente ao período de iniciação, representando a penetração de agentes agressivos até alcançarem a armadura; a fase seguinte é condicionada à integridade da película passivadora do aço, uma vez que, em contato com os íons agressivos, começa a despassivar; por fim, a última etapa (propagação) diz respeito ao desenvolvimento da corrosão propriamente dita, cuja velocidade oscila em função das variáveis envolvidas nas reações do fenômeno.

Uma vez iniciado o processo corrosivo, na fase de propagação, o cloreto (Cl^-) livre se combina com íons de ferro da armadura resultando em FeCl_2 . Este elemento, no entanto, é liberado em contato com a água, junto ao íon H^+ . O cloreto se torna livre novamente para se combinar com um novo átomo de ferro. Uma vez que a ligação do Cl^- ao ferro não é estável, considera-se um valor limite da presença do íon que seja capaz de agredir significativamente o aço no concreto armado (FIGUEIREDO e MEIRA, 2011).

De acordo com Figueiredo (2011), apesar de a concentração do cloreto variar conforme o cobrimento do concreto, existe uma tolerância considerada, quando em contato com a armadura, na qual o cloreto rompe a película passivadora do aço e inicia o processo de corrosão. Esse valor, no entanto, é discutido e diferente para diversas normas entre diferentes países, considerando fatores como umidade relativa e relação Cl^-/OH^- . Alguns exemplos são apresentados na Tabela 2 (as normas, normalmente, referem-se ao teor de cloretos totais).

Um valor crítico preciso do teor de cloreto presente em uma estrutura de concreto armado demanda uma análise de situações específicas de variáveis atuando simultaneamente, referentes à composição do cimento, da solução contendo cloreto e do ambiente de exposição. Em geral, um teor crítico de cloretos totais aceito é de 0,4% em relação à massa de cimento. Apesar de ser considerado conservador, é adotado por normas de alguns países europeus, de modo a atender à maioria das situações de exposição de uma estrutura de concreto armado ao íon (MCGRATH e HOOTON, 1999; FIGUEIREDO e MEIRA, 2011).

Tabela 2 – Limite tolerado de cloreto admitido entre diferentes países

Norma	País	Ano	Teor de cloretos recomendado
ABNT NBR 12655	Brasil	2015	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, para concreto armado exposto a cloretos (condição de serviço da estrutura);
			$\leq 0,30\%$ em relação à massa de cimento, para concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura;
			$\leq 0,40\%$ em relação à massa de cimento, para concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura);
			$\leq 0,05\%$ para concreto protendido
ACI 318S-05	EUA	2014	$\leq 0,15\%$ da massa de cimento (ambiente com Cl^-)
			$\leq 0,3\%$ da massa de cimento (ambiente normal)
			$\leq 1\%$ da massa de cimento (ambiente seco)
			$\leq 0,06\%$ da massa de cimento (concreto protendido)
EN 206-1	Portugal	2007	0,4% da massa de cimento
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JSCE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,6 \text{ kg/m}^3$ de concreto

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011)

Com relação aos fatores que contribuem à velocidade de penetração do íon na estrutura, a saturação do concreto é uma condição de extrema importância ao ingresso do cloreto, considerando o efeito da difusão. Além disso, a presença de adições no cimento, como cinzas volante e escórias de alto forno, toleram teores críticos de cloretos maiores que os apresentados na Tabela 2, devido à capacidade de combinação do íon, chegando até 0,7 e 3% sobre a massa de cimento respectivamente (YUAN e SANTHANAM, 2009; CHEEWAKET *et al.*, 2010; FIGUEIREDO, 2011).

Glass e Buenfeld (1997) destacam, na Tabela 3, algumas características referentes ao material e ao ambiente de exposição que devem ser levados em consideração para o caso de uma análise mais precisa do teor crítico de cloreto no concreto.

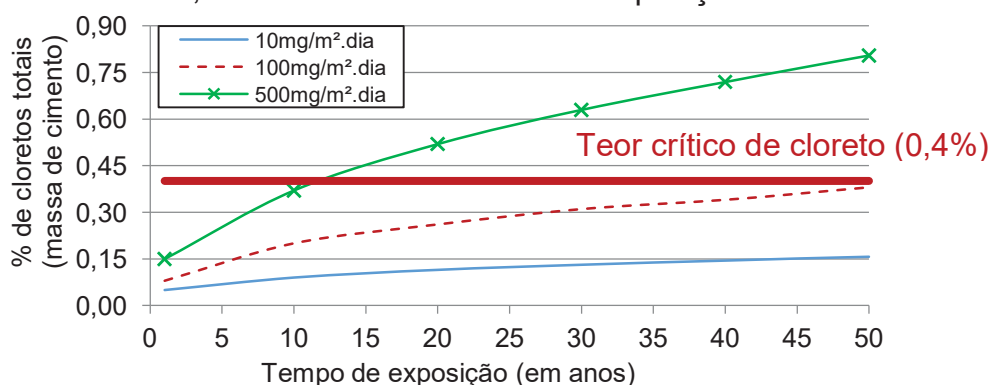
Tabela 3 – Fatores que influenciam o teor crítico de cloretos

Interface c/ o aço	Fatores referentes ao concreto		Ambiente de exposição
	Tipo de cimento	Crítérios de dosagem	
Vazios e falhas	Quantidade de C_3A	Relação a/c	Temperatura e UR
Oxidação pré-existente	Alcalinidade	Condição de cura	Concentração de O_2
	Adição utilizada	Cobrimento	Fonte de íons cloreto

Fonte: Adaptado de Glass e Buenfeld (1997)

Como complemento à Tabela 3, Meira *et al.* (2007) apresentam, a partir da Figura 13, como a concentração de cloretos totais aumenta significativamente em função da concentração de cloretos disponíveis no ambiente. Nesse estudo, é visível como o tempo necessário para que a concentração proposta de 0,4% do íon sobre a massa de cimento alcance um cobrimento médio da armadura pode ser pequeno em relação à diferença na concentração superficial do cloreto, como, por exemplo, de 11 anos para uma concentração de 500 mg/m².dia.

Figura 13 – Variação da concentração de cloreto em função da deposição do íon, decorrente do ambiente de exposição



Fonte: Adaptado de Meira (2007)

4 ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETO

A partir dos diferentes mecanismos de transporte do cloreto no interior do concreto e das diferentes maneiras de encontrar o íon nos poros do material (livre ou combinado), existem diversos meios de avaliar a resistência de uma estrutura em concreto em relação ao ingresso do cloreto. Além disso, as próprias características do concreto – como teor de sílica e alumina, tipo de adição, tempo e condição de cura, porosidade –, além das condições ambientais – umidade relativa, temperatura, concentração de sais – são fatores de influência sobre a profundidade na qual o cloreto consegue alcançar (MEIRA *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2017b; LIU *et al.*, 2017c; MA *et al.*, 2018).

De acordo com Yuan e Santhanam (2012) e Ahmad e Kumar (2013), quando se considera o transporte do cloreto de maneira natural, tal fenômeno ocorre de maneira demasiada lenta para se analisar a qualidade do material pelo qual o íon permeia. Nessa situação, surgem os ensaios acelerados, que excitam o íon através da aplicação de uma corrente elétrica e uma solução de polaridade oposta à do íon. No entanto, os ensaios acelerados representam de maneira menos precisa o real comportamento do íon em relação aos ensaios de difusão natural (JEN *et al.*, 2017). Além disso, deve-se considerar que a penetração do íon no concreto não ocorre de maneira constante, sendo, então, distinguidas duas condições: estado não estacionário (concentração de cloreto varia em função da capacidade de combinação à matriz cimentícia) e estado estacionário (fluxo de cloreto livre no material). Nesse contexto, alguns métodos de análise da penetração do cloreto no concreto e suas respectivas referências normativas são expostos na Tabela 4.

Ainda, alguns métodos de análise de cloreto consideram a aspersão de solução de nitrato de prata (AgNO_3) como método colorimétrico para visualização da penetração do íon no concreto. A partir da formação de cloreto de prata (AgCl), é possível visualizar uma região esbranquiçada, que contém o íon Cl^- . As leituras de profundidade de penetração de cloreto são obtidas utilizando uma solução de 0,1 mol de AgNO_3 , que, de acordo com Otsuki *et al.* (1992), reage quando há uma concentração mínima de 0,15% do íon sobre a

massa de cimento. Dessa maneira, o método não é indicado para análise em estruturas de concreto protendido, uma vez que é recomendado não ultrapassar um teor de 0,05% do íon, segundo os valores apresentados na Tabela 2.

Destaca-se, na Tabela 4, métodos de análise do cloreto normatizados em alguns países, havendo, ainda, diversos métodos propostos por alguns autores (TRUC *et al.*, 1998; Castellote *et al.*, 2002; FRIEDMANN *et al.*, 2004) – inclusive, as normas NT BUILD 492 e UNE 83987 derivaram de estudos elaborados por Tang e Nilsson (1992) e Castellote *et al.* (2001), respectivamente.

Tabela 4 – Resumo dos principais métodos normatizados para avaliação da penetração do cloreto no concreto

Base teórica	Método de ensaio	Parâmetro de análise	Duração	Referência normativa
Segunda Lei de Fick	Imersão em solução de NaCl	Coefficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	> 35 dias	NT BUILD 443
	Imersão em solução de NaCl	Coefficiente de difusão aparente do cloreto no concreto	> 35 dias	ASTM C1556
Equação de Nernst Planck	Aplicação de corrente elétrica (12V) num sistema com NaCl e NaOH	Coefficiente de difusão do cloreto no estado estacionário	Várias semanas	NT BUILD 355
	Aplicação de corrente elétrica (10 a 60V) num sistema com 11,1% NaCl	Coefficiente de migração do cloreto no estado não estacionário	24 a 96 horas	NT BUILD 492
	Aplicação de corrente elétrica (12V) num sistema com NaCl e H ₂ O	Coefficiente de difusão do cloreto nos estados estacionário e não estacionário	> 14 dias	UNE 83987
Outros	Aplicação de corrente elétrica (60V) num sistema com 3% NaCl e NaOH	Resistência do concreto à penetração do cloreto em função da carga passante	6 horas	ASTM C1202
	Exposição de uma face de amostra prismática de concreto a NaCl	Perfil de cloreto	> 90 dias	ASTM C1543
	Aplicação de corrente elétrica (60V) num sistema com NaCl e NaOH	Resistência do concreto à penetração do cloreto em função da carga passante	6 horas	AASHTO T277
	Exposição de uma face de amostra prismática de concreto a solução de NaCl	Perfil de cloreto (ação de absorção capilar e difusão do cloreto)	90 dias	AASHTO T259

Fonte: Adaptado de Yuan e Santhanam (2012)

4.1. DETERMINAÇÃO DAS NORMAS PARA ESTUDO

Os ensaios que utilizam a aplicação de um campo elétrico para movimentação do cloreto têm a vantagem de serem mais rápidos com certa representatividade. Duas normas americanas são comumente utilizadas: ASTM C1202 e AASHTO T277, conhecidas como *Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)*. Pela aplicação de uma tensão constante, são tomadas leituras de corrente elétrica passante no sistema. O resultado do ensaio é função direta da resistência da amostra de concreto à penetração do íon e depende de fatores como conectividade do sistema de poros capilares e concentração iônica na solução dos poros. Por outro lado, a norma NT BUILD 492 recomenda um ajuste de tensão aplicada às amostras conforme a medida inicial de corrente elétrica passante no sistema, o que altera, também, o tempo de ensaio. Tal medida visa diminuir o aquecimento gerado nas soluções, que pode comprometer o processo de migração do íon no interior da amostra de concreto (YUAN e SANTHANAM, 2012; THOMAS *et al.*, 2018).

As normas americanas AASHTO T259 e ASTM C1543, de difusão natural do cloreto, preveem a contenção de uma solução contendo NaCl sobre uma face de uma amostra prismática de concreto, enquanto a face oposta é exposta a uma atmosfera contendo 50% de umidade relativa (as laterais do concreto são impermeabilizadas). Entretanto, a condição de exposição proposta permite que outros mecanismos de transporte, que não a difusão, ocorram, como a absorção capilar (considerando a baixa umidade em uma face exposta da amostra). Nessa situação, a norma NT BUILD 443 considera a saturação da amostra de concreto em solução contendo cal antes da imersão em solução contendo cloreto, evitando o efeito da absorção inicial e garantindo que não haja dissolução da portlandita. Além disso, a concentração da solução também é mais agressiva (16,5% de NaCl em comparação com 3% proposta pela norma AASHTO T259). O resultado de ambas as normas é função da retirada de amostras de concreto em determinadas profundidades após certo tempo de exposição (geralmente meses), de modo a determinar a concentração de cloreto no concreto. Tal concentração pode ser expressa em função de cloretos livre ou total. A elevada duração dos ensaios em

comparação aos métodos acelerado permitem um resultado mais próximo à realidade. (AHMAD E KUMAR, 2013; JEN *et al.*, 2017; THOMAS *et al.*, 2018).

Assim, considerando o parâmetro de saída de cada norma, bem como os diferentes procedimentos necessários para obtenção dos resultados, foram selecionados quatro métodos para avaliação da penetração do cloreto no concreto, baseados nas seguintes normas: ASTM C1202:2017 e NT BUILD 492:1999 como métodos acelerados, e AASHTO T259:1980 e NT BUILD 443:1995 como métodos naturais.

4.2. ESTADO DA ARTE

Tang e Sørensen (2001) compararam concretos compostos com diferentes aglomerantes a partir de três normas de penetração de cloretos: NT BUILD 492 (ensaio de migração no estado não estacionário), NT BUILD 443 (ensaio de imersão) e NT BUILD 355 (ensaio de difusão no estado estacionário). Os autores encontraram boa correlação entre os ensaios de migração e imersão, sendo que este apresenta precisão satisfatória, podendo ser utilizado como referência na análise de penetração de cloreto no concreto (uma vez que é mais próximo à realidade), com baixo coeficiente de variação.

Yildirim *et al.* (2011) utilizaram cimentos com diferentes adições (incluindo uma composição com 25% de cinza volante) e diferentes classes de resistência na dosagem de concretos para avaliar a resistência à penetração de cloretos a partir da norma ASTM C1202. De acordo com o estudo, concretos com cinza volante para relações água/aglomerante acima de 0,5 apresentaram uma redução na resistência à penetração de cloretos acima de 50% em comparação aos concretos moldados sem adição. Para uma relação água/aglomerante de 0,45, a qualidade do concreto contendo cinza volante frente à penetração de cloreto foi similar à qualidade das amostras contendo escória de alto forno, com carga total inferior a 1000 Coulombs, isto é, penetrabilidade muito baixa do íon. Uma justificativa elencada pelos autores para o resultado da amostra contendo adição pozolânica foi devido à redução da permeabilidade do concreto.

A fim de avaliar a resistência à penetração de cloreto em concretos dosados com agregados leves, Liu *et al.* (2011) utilizaram as normas ASTM C1202, NT BUILD 492 e AASHTO T259, destacando esta última devido à maior precisão através da análise de cloreto total. Jen *et al.* (2017) compararam as normas NT BUILD 492 e NT BUILD 443 para representação da penetração do cloreto no concreto. Neste estudo, os autores chamam atenção à necessidade de maior tempo de exposição ao cloreto para ocorrer a combinação do íon no interior do concreto. Dessa forma, o ensaio acelerado, apesar de mais atrativo em termos práticos, pode não ser suficientemente representativo (mais conservador), uma vez que pode não haver tempo para a formação de sal de Friedel. Da mesma maneira, Dehghan *et al.* (2017) avaliaram o coeficiente de migração (NT BUILD 492) e o coeficiente de difusão (NT BUILD 443) do cloreto, ambos no estado não estacionário. Os autores afirmam que é esperado que os coeficientes fossem diferentes; no entanto, para as duas normas, os resultados obtidos seguem uma tendência, com boa correlação entre os coeficientes.

Aponte *et al.* (2012) avaliaram o coeficiente de difusão no estado não estacionário de concretos dosados com diferentes teores de cinza volante. Os resultados apresentaram pouca variação nos concretos contendo 25 e 43% da adição. Além do efeito da adição, os resultados mostraram significativa influência da relação água/cimento e do tempo de cura das amostras.

Pastor *et al.* (2016) utilizaram como referência a norma UNE 83987 para estudo da durabilidade de grautes produzidos com cinza volante (teor entre 36 e 55%). Independentemente da idade e da relação água/cimento, todas as amostras contendo cinza volante apresentaram um coeficiente de difusão no estado não estacionário inferior em comparação às amostras sem adição. A principal justificativa destacada pelos autores, neste caso, se deve à maior capacidade de combinação do cloreto em concretos contendo cinza volante (maior teor de aluminato), uma vez que a formação de cloroaluminato reduz a disponibilidade de cloreto livre no interior do material.

Valipour *et al.* (2017) avaliaram estruturas de concreto expostas a zonas de maré, zonas de respingo e em condição de imersão em solução contendo cloreto em laboratório (NT BUILD 443). Neste, foram consideradas

diferentes adições à dosagem do concreto, como sílica ativa, metacaulim e zeólita. Os autores também encontraram dependência entre a relação água/cimento e a profundidade de penetração do cloreto no concreto, além de confirmarem a maior agressividade da zona de respingos em relação à zona de maré. Além disso, os resultados obtidos em laboratório para determinação do teor de cloreto total (solúvel em ácido nítrico), em relação à massa de concreto, se mostraram razoáveis em comparação às condições reais de exposição, estando, em geral, entre os valores obtidos nas zonas de maré e respingos.

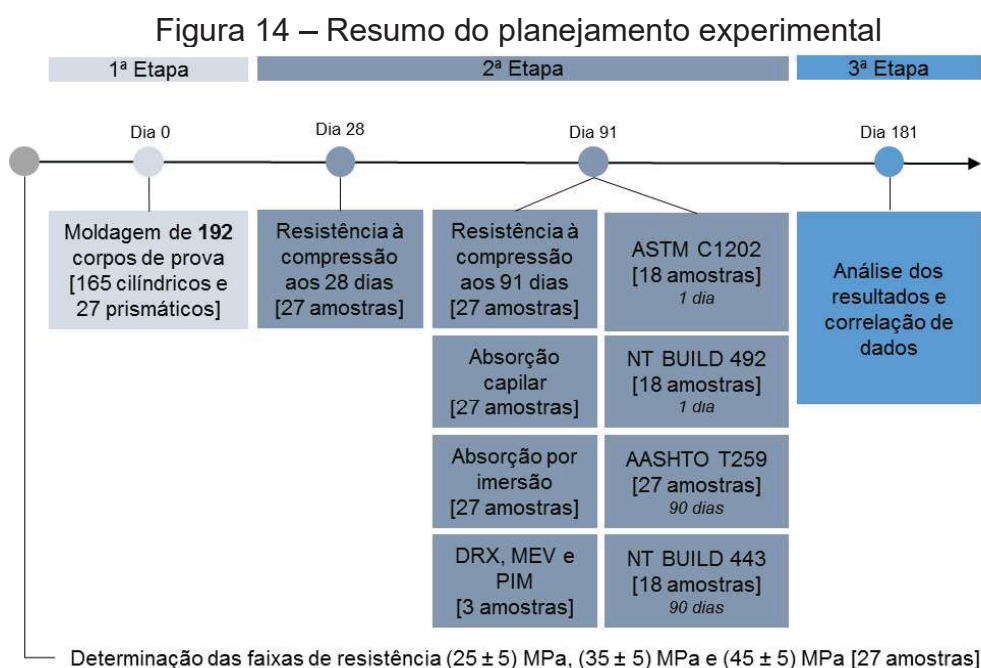
Thomas *et al.* (2018) estudaram a permeabilidade do cloreto em concretos ativados por álcali a partir das normas AASHTO T259 e ASTM C1202. Os autores destacam a primeira norma como sendo um método confiável de representação da penetração do cloreto no concreto, uma vez que permite estimar o coeficiente de difusão e analisar tanto o cloreto livre quanto o total – e, neste caso, avaliar a capacidade de combinação do íon com a matriz cimentícia. Com relação ao ensaio acelerado, os autores destacam a questão do aumento da temperatura nas soluções, o que comprometeria a real taxa de penetração do cloreto no concreto. Além disso, não é possível assumir que apenas o cloreto é transportado no interior da amostra. Os autores alertam, ainda, à questão da idade das amostras; uma vez que o ensaio proposto pela norma AASHTO T259 requer um tempo de exposição de 90 dias, espera-se que os resultados apresentem maior resistência à penetração de cloretos, devido ao maior grau de hidratação do aglomerante. Por fim, os autores apresentaram boa correlação entre os resultados, expressos em carga total passante na amostra e concentração de cloreto livre no concreto.

Diante do exposto, a partir das normas apresentadas – e respectivos resultados esperados – este trabalho buscou avaliar o efeito benéfico da cinza volante na dosagem de concreto, sob a ótica da penetração de cloreto. Ainda, conforme os parâmetros de saída resultantes dos métodos apresentados pelas normas se apresentam de maneira diversa, acredita-se que as normas podem ser confrontadas – complementadas – entre si, de modo a garantir uma avaliação mais precisa da qualidade do concreto e simulando um ambiente de maneira mais fiel, além de permitir uma correlação entre os resultados e facilitar ao engenheiro a escolha do método mais viável.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização desta pesquisa, foram considerados três tipos de cimento (CPV-ARI, CPII-Z e CPIV), com diferentes teores de cinza volante, e três classes de resistência do concreto (25, 35 e 45 MPa) para dosar corpos de prova (CP) de concreto e ensaiá-los conforme as normas de penetração de cloreto, totalizando 9 combinações traço. Assim, foram estabelecidas três etapas de procedimento, após a determinação das faixas de resistência do concreto a partir de um estudo de dosagem com 27 corpos de prova de concreto.

Na primeira etapa, é considerado o preparo das amostras de concreto (total de 192 corpos de prova de concreto); na segunda, são realizados os procedimentos para os ensaios de caracterização (capítulo 5.3) e penetração de cloreto nas amostras (capítulo 5.4); por fim, na terceira etapa, os resultados são compilados e é realizada a correlação de dados dos ensaios. Para resumir o planejamento experimental deste trabalho, são apresentadas, na Figura 14, as três etapas de desenvolvimento da dissertação com as respectivas atividades e o tempo previsto de cura e/ou exposição.



Fonte: O autor (2018)

A quantidade total de corpos de prova (CPs) prevista para realização de cada ensaio deste estudo está especificada na Tabela 5, sendo 192 amostras de concreto, além das 27 amostras moldadas previamente para determinação das faixas de resistência (totalizando 219 corpos de prova em concreto). Considerando um mínimo de três amostras para cada ensaio, e se atentando que, para cada um dos três tipos de cimento foram previstas três faixas de resistência, foram moldadas nove amostras cilíndricas de Ø 100 x 200 mm (quando ensaiadas sem modificação geométrica) e seis amostras de mesma dimensão para os ensaios que demandaram corte transversal (amostras menores). A exceção da quantidade de CPs se dá para a análise de imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV), distribuição de poros e porosidade por porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e composição do concreto por difração de raios X (DRX). Tais análises requerem uma amostra de concreto de tamanho bastante inferior em relação à dimensão de um corpo de prova cilíndrico padrão (Ø 100 x 200 mm), o que justifica a pequena quantidade prevista na tabela. Além disso, para estes ensaios de microestrutura, foram utilizadas as amostras de concreto após alguns ensaios de exposição ao cloreto.

As análises de microestrutura (DRX, PIM e MEV) foram previstas de modo a complementar os resultados provenientes das amostras que ficaram em exposição à solução de cloreto, permitindo confirmar a presença do íon no concreto e o efeito da cinza volante. Nesse sentido, as três amostras previstas na Tabela 5 para os referidos ensaios foram moldadas apenas como referência, enquanto que as amostras contaminadas com cloreto foram extraídas diretamente dos corpos de prova após o término de cada ensaio de penetração de cloreto. Ainda, por se tratarem de técnicas que demandam equipamentos específicos e parceria com outros centros de pesquisa – o que limita a quantidade de análises –, optou-se por avaliar apenas as amostras de uma classe de resistência para cada tipo de cimento (capítulo 5.5).

A fim de avaliar a penetração do cloreto no concreto, quatro normas internacionais foram selecionadas (ASTM C1202:2017, NT BUILD 492: 1999, AASHTO T259:1980 e NT BUILD 443:1995), com base nos estudos apresentados no capítulo 4. Para a análise da influência da cinza volante sobre

a ação do cloreto no concreto, as amostras de concreto foram moldadas considerando a utilização de cimentos com diferentes teores da adição: 0% (CPV-ARI), 12,5% (CPII-Z) e 27% (CPIV). Os teores apresentados foram fornecidos pelo fabricante, com margem de precisão de 1,5%. Por fim, considerando-se a determinação de uma classe mínima de concreto exposto ao íon cloreto, foram utilizados três traços com abatimento fixado (60 ± 10 mm), de modo a obter resistências mecânicas nas seguintes faixas: 25 ± 5 MPa, 35 ± 5 MPa e 45 ± 5 MPa.

Tabela 5 – Resumo da quantidade de corpos de prova de concreto moldados para o estudo, considerando três faixas de resistência para cada tipo de cimento e um mínimo de três amostras por ensaio

Ensaio	Geometria	CPV-ARI	CPII-Z	CPIV	
Resistência à compressão (28 dias)	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	9	9	9	{ 3 para 25 MPa 3 para 35 MPa 3 para 45 MPa
Resistência à compressão (91 dias)	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	9	9	9	
Absorção por capilaridade	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	9	9	9	
Absorção por imersão	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	9	9	9	
ASTM C1202 *	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	6	6	6	
NT Build 492 *	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	6	6	6	
AASHTO T259	Prismático (250 x 250 x 90 mm)	9	9	9	{ 2 para 25 MPa 2 para 35 MPa 2 para 45 MPa
NT Build 443 **	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	6	6	6	
DRX, PIM, MEV	Cilíndrico (Ø100 x 200 mm)	1	1	1	

* corpo de prova cortado em 4 discos de Ø100 x 50 mm

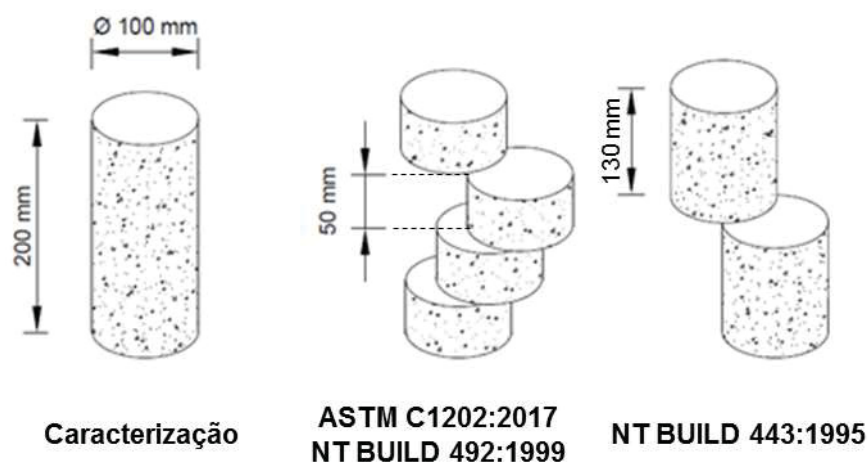
** corpo de prova cortado em 2 discos de Ø100 x 100 mm

Fonte: O autor (2018)

Para a avaliação das características do concreto endurecido (resistência à compressão aos 28 e 91 dias, microestrutura e absorção por capilaridade e por imersão) e da análise da penetração de cloreto no concreto, foram moldados 165 corpos de prova cilíndricos (Ø 100 x 200 mm) e 27 corpos de prova prismáticos (250 mm x 250 mm x 90 mm), todos em concreto. Na Figura 15, é apresentado o esquema de geometria ideal para os ensaios de caracterização do concreto (dimensão padrão) e os ensaios propostos para as normas ASTM C1202:2017 (Ø 100 x 50 mm), NT BUILD 492:1999 (Ø 100 x 50

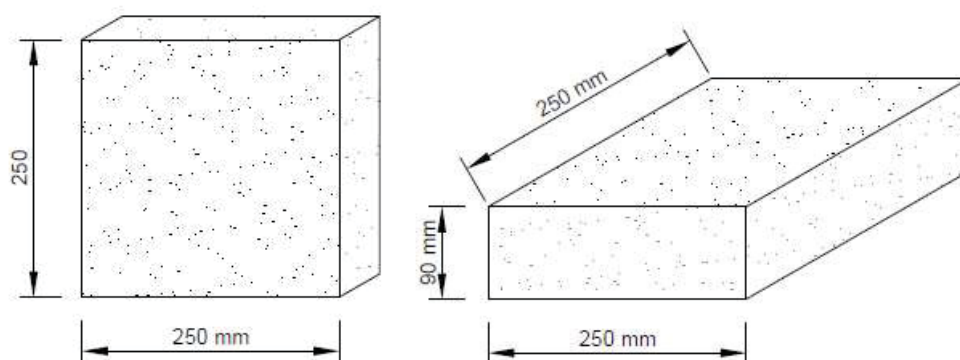
mm) e NT BUILD 443:1995 (\varnothing 100 x 100 mm). Na Figura 16, é representado o esquema geométrico do corpo de prova para ensaio da norma AASHTO T259:1980.

Figura 15 – Esquema dos corpos de prova cilíndricos de concreto para ensaios de caracterização e penetração de cloreto



Fonte: O autor (2018)

Figura 16 – Esquema dos corpos de prova prismáticos de concreto para ensaio de difusão natural (AASHTO T259:1980)



Fonte: O autor (2018)

5.1. MATERIAIS

Neste capítulo estão apresentados os materiais utilizados para a produção dos corpos de prova em concreto.

5.1.1. Cimento Portland

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionados três tipos de cimento, produzidos na região metropolitana de Curitiba-PR: cimento Portland CPV-ARI, CPII-Z e CPIV. O cimento CPV-ARI foi escolhido por ser o cimento comercializado no mercado brasileiro com maior teor de clínquer – e consequente menor teor de adição (até 5% de fíler calcário). Por outro lado, os cimentos CPII-Z e CPIV possuem adição de cinza volante (de mesma origem) em quantidades diferentes (o que permite comparar o efeito da adição nas propriedades de resistência do concreto à penetração de cloreto): o primeiro contém aproximadamente 12,5% de material pozolânico enquanto o segundo conta com cerca de 27%. As propriedades químicas e mecânicas dos três tipos de cimento são apresentadas na Tabela 6 e na Tabela 7 respectivamente.

Tabela 6 – Propriedades químicas dos cimentos utilizados

Tipo de cimento	Perda ao fogo %	CaO Livre %	Resíduo insolúvel %	Equivalente alcalino %	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %
CPV-ARI	3,44	0,76	0,67	0,66	4,16	19,02	2,92	60,75	3,67	3,13
CPII-Z	5,68	0,57	10,93	0,85	6,40	21,70	3,14	54,27	3,09	2,71
CPIV	3,43	0,59	25,65	1,15	9,61	29,54	3,82	45,56	2,86	2,28

Fonte: Dados do fornecedor (2018)

Tabela 7 – Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos utilizados

Tipo de cimento	Expansibilidade a quente mm	Início de pega h:min	Fim de pega h:min	Blaine m ² /kg	Resistência à compressão (MPa)			
					1 dia MPa	3 dias MPa	7 dias MPa	28 dias MPa
CPV-ARI	0,33	3:15	4:00	4380	23,20	37,90	45,07	53,90
CPII-Z	0,00	4:10	4:57	3570	11,95	26,4	31,85	41,1
CPIV	0,50	4:10	5:00	4200	12,60	26,50	33,30	47,50

Fonte: Dados do fornecedor (2018)

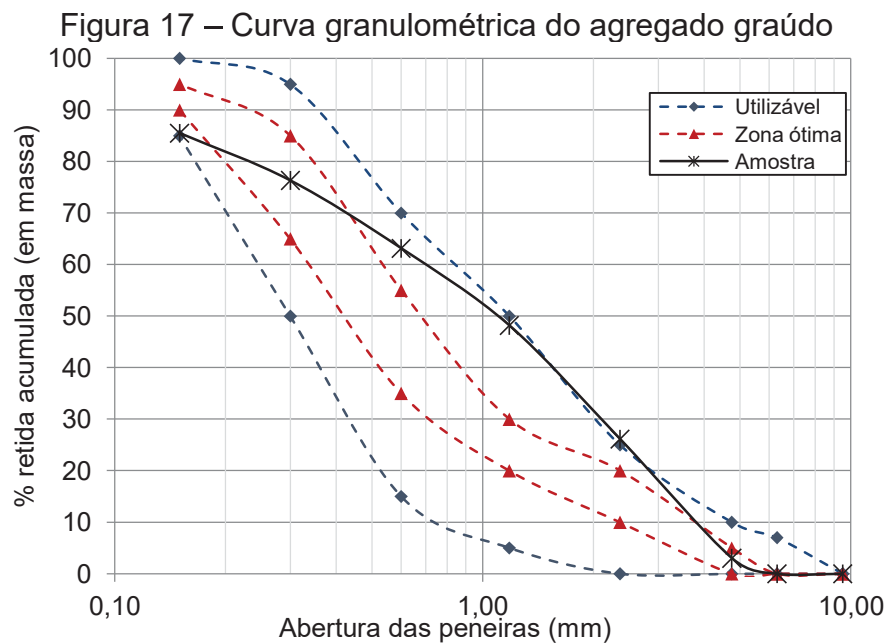
De acordo com a Tabela 6, foi possível verificar a maior quantidade de alumínio, silício e ferro para os cimentos que possuem maior teor de cinza volante, em confirmação com o exposto por Liu *et al.* (2016) e Blisset e Rowson (2012). De acordo com estes autores, a composição química da adição mineral é predominantemente de óxidos de silício, alumínio e ferro, podendo chegar a

mais de 90%, o que justifica o aumento desses elementos na composição dos cimentos apresentada.

Segundo Liu *et al.* (2017b) e Liu *et al.* (2017c), o maior teor de SiO_2 auxilia no ganho extra de resistência, devido à formação de C-S-H a longo prazo, conforme o composto reage com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. O refinamento dos poros causado pelo efeito da cinza volante reflete, inclusive, na qualidade da zona de transição.

5.1.2. Agregado miúdo

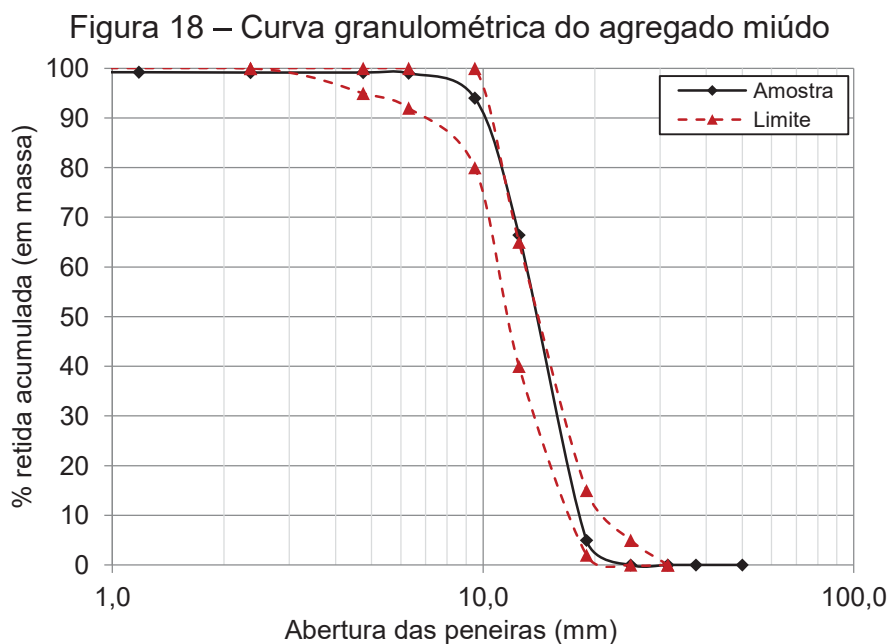
O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural, proveniente da região metropolitana de Curitiba-PR, considerada grossa, com granulometria parcialmente na zona ótima e parcialmente na zona utilizável, com módulo de finura igual a 3,96 e diâmetro máximo característico igual a 4,8 mm. A areia apresentou massa específica igual a $2,66 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária igual a $1,63 \text{ g/cm}^3$, ensaiado conforme as normas NBR NM 52:2002 e NBR NM 45:2006. A absorção de água da areia foi de 0,61%, de acordo com a norma NBR NM 30:2001. A curva granulométrica da areia utilizada é apresentada na Figura 17



Fonte: O autor (2018)

5.1.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo é originário de gnaiss, extraído na região metropolitana de Curitiba-PR. Trata-se de brita 1 (identificação comercial), com dimensão máxima característica de 19 mm e índice de forma de 2,29. O agregado graúdo possui massa específica igual a $2,69 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária $1,44 \text{ g/cm}^3$, ensaiados conforme as normas NBR NM 53:2009 e NBR NM 45:2006. A absorção de água, por sua vez, foi de 0,53%. A curva granulométrica da brita utilizada é apresentada na Figura 18.



Fonte: O autor (2018)

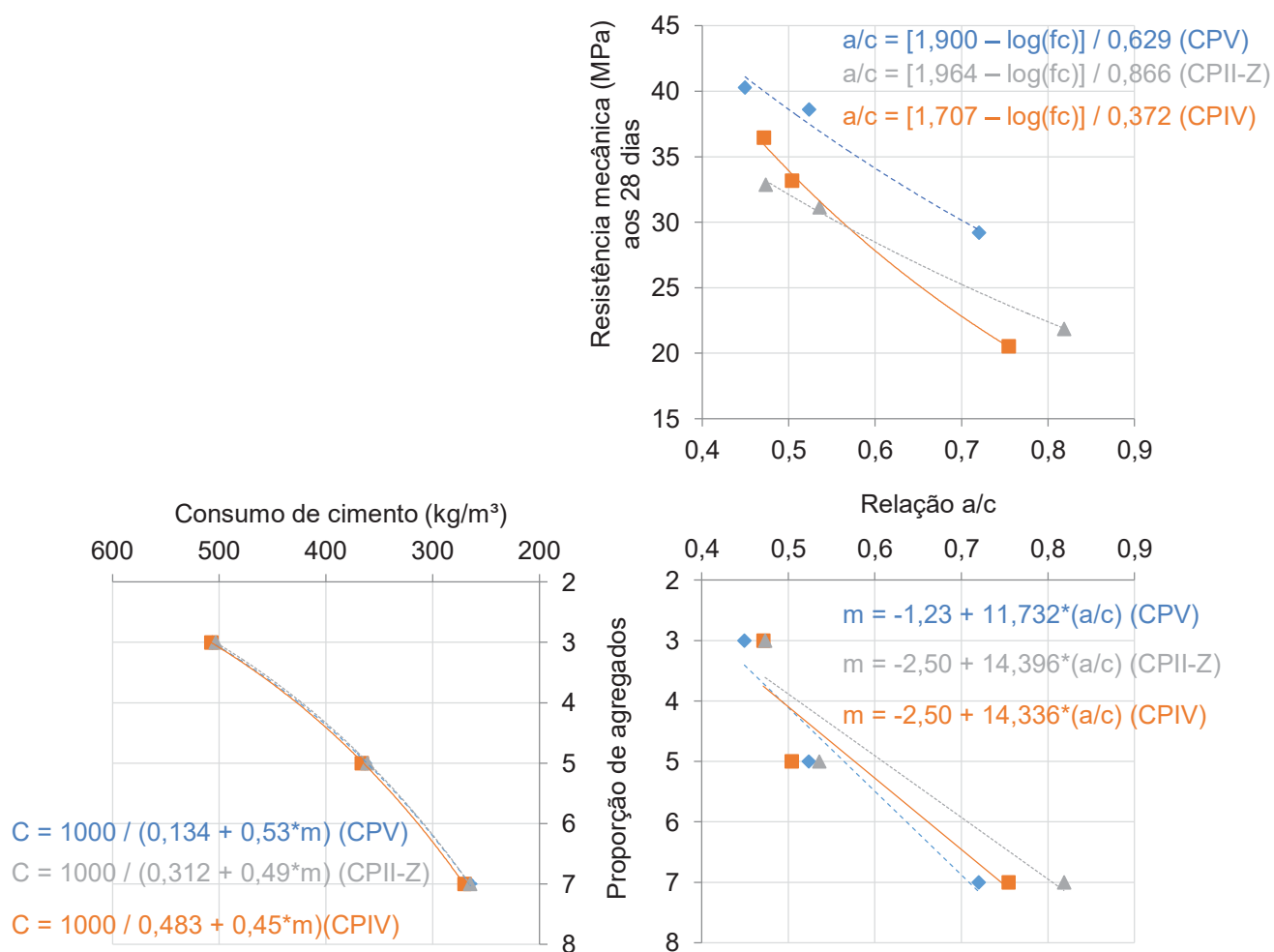
5.2. PREPARO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO

O concreto foi moldado conforme instruções da norma ABNT NBR 5738:2015. Para a determinação do abatimento do concreto fresco, tomou-se por base a norma NBR NM 67:1998. Por fim, para a avaliação da resistência à compressão axial das amostras – e assim determinar as classes de concreto a serem estudadas –, foi utilizada a norma ABNT NBR 5739:2007.

Como os concretos moldados com diferentes teores de cinza volante apresentaram diferentes resistências mecânicas conforme se variou o traço utilizado (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2017c; THOMAS *et al.*, 2018), foi elaborado um estudo de dosagem baseado no método IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1993), para a determinação de faixas de resistência à compressão média, de modo a selecionar três categorias de concreto (25, 35 e 45 MPa). Assim, foram estabelecidos traços denominados muito pobre, intermediário e muito rico, de acordo com a nomenclatura proposta pelos autores do método. A determinação do teor de argamassa para todos os concretos foi baseada no traço mais rico, sendo de 53% para um abatimento de 60 ± 10 mm (*slump-test*).

O diagrama de dosagem obtido está apresentado na Figura 19, onde foi possível obter, de maneira aproximada, e a partir das faixas de resistência (3) do concreto moldado com cada tipo de cimento (3), a relação água/cimento (Lei de Abrams), a proporção entre cimento e agregados (Lei de Lyse) e o consumo de aglomerante (Lei de Molinari). Dessa maneira, criou-se uma combinação de nove variações de concreto, alterando-se os três tipos de cimento e as três classes propostas de resistência do concreto.

Figura 19 – Diagrama de dosagem realizado pelo método IPT/EPUSP, com teor de argamassa de 53%



Fonte: O autor (2018)

Tendo por base o estudo de dosagem, foi possível determinar o traço de concreto referente às resistências estabelecidas no planejamento experimental. As informações correspondentes à proporção dos materiais

utilizados para a dosagem do concreto, em massa, utilizado para este trabalho, bem como os valores referentes ao ensaio de abatimento de tronco de cone estão apresentados na Tabela 8, identificando as amostras em função do tipo de cimento (CPV-ARI identificado como “V”, CPII-Z como “II-Z” e CPIV como “IV”) e da classe de concreto (concreto na faixa de resistência de 25 ± 5 MPa identificado como “C25”, de 35 ± 5 MPa como “C35” e de 45 ± 5 MPa como “C45”).

Tabela 8 – Informações para dosagem do concreto

Amostra	Traço (proporção em massa)					Teor de cinza volante (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump-test (mm)
	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Aditivo (% cimento)			
V-C45	1	1,40	2,10	0,41	-	0,00	486	67
V-C35	1	2,18	2,82	0,54	-	0,00	347	60
V-C25	1	3,51	4,01	0,72	-	0,00	259	70
II-Z-C45	1	1,40	2,10	0,40	-	12,43	492	58
II-Z-C35	1	2,18	2,82	0,50	-	12,43	361	60
II-Z-C25	1	3,24	3,76	0,72	-	12,43	266	65
IV-C45	1	1,40	2,10	0,40	0,1	27,15	486	60
IV-C35	1	2,18	2,82	0,50	-	27,15	366	51
IV-C25	1	3,24	3,76	0,73	-	27,15	270	50

Fonte: O autor (2018)

O consumo de cimento e a relação água/cimento para cada faixa de resistência foram similares, independentemente do tipo de cimento, considerando um abatimento fixado. Em resumo, para um concreto com resistência mecânica de 45 MPa (C45), foi utilizado um consumo de cimento de 490 ± 10 kg/m³ e relação água/cimento de $0,40 \pm 0,02$; para um concreto de 35 MPa (C35), o consumo de cimento foi de 356 ± 10 kg/m³ e relação a/c de $0,52 \pm 0,02$; por fim, para o concreto de 25 MPa (C25), o consumo de cimento foi de 265 ± 10 kg/m³ e a relação água/cimento foi de $0,72 \pm 0,02$.

Para atingir abatimento de 60 mm, à amostra IV-C45 foi acrescido 0,1% de aditivo superplastificante (dosado em função da massa de cimento). Trata-se de um aditivo superplastificante TEC-FLOW 8000, com massa específica de 1,1 g/cm³ e coloração alaranjada, a base de policarboxilato.

Cabe salientar que a relação água/cimento das três amostras de concreto classe C25 e C35 (bem como as resistências alcançadas) encontrou-

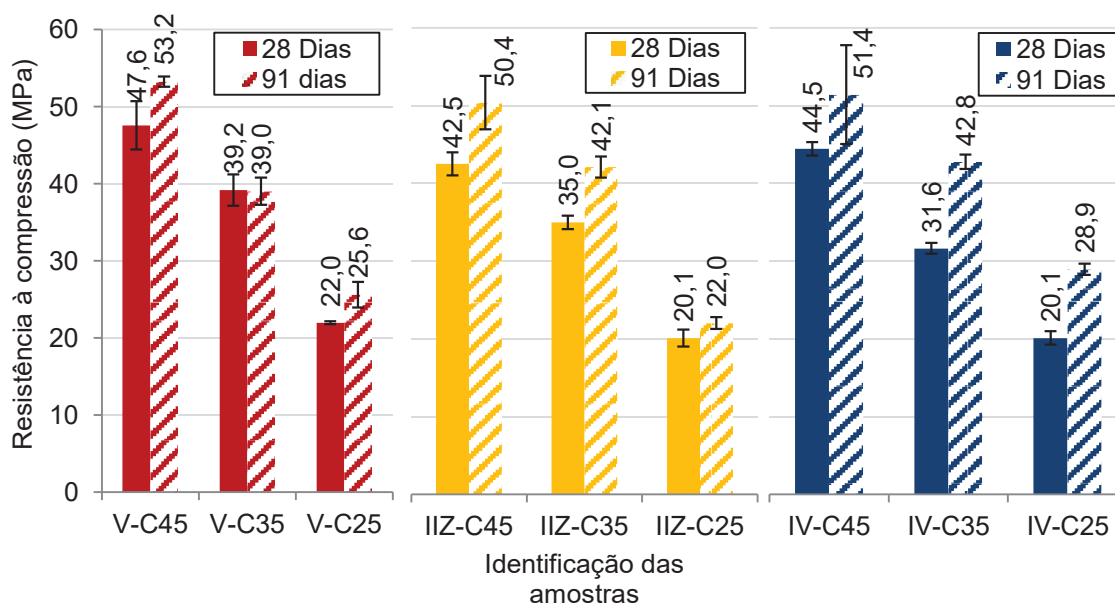
se acima do limite estabelecido para a região litorânea pela norma ABNT NBR 6118:2014, que é de 0,45 tanto para concreto armado quanto protendido, em zona de agressividade elevada (classificada como IV pela norma). Entretanto, considerou-se a existência de estruturas antigas à atualização da norma, bem como a construção de obras de pequeno porte e com baixo controle de qualidade, o que pode resultar em situações discordantes à norma em questão. Além disso, o critério de estabelecer as faixas de concreto das amostras foi prioritário em relação à relação água/cimento.

Após a moldagem, as amostras foram encaminhadas para câmara úmida, com temperatura e umidade relativa controlados, fixadas em $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e 95% respectivamente. O período de cura foi de 91 dias, de modo a considerar que a hidratação de concretos contendo adição pozolânica demandam maior período de tempo para se consolidar (DAL MOLIN, 2011; GJØRV, 2015; LIU *et al.*, 2017c; SØRENSEN e POULSEN, 2017). Além disso, para os ensaios de durabilidade, onde o concreto é exposto a água (caso deste estudo), é importante respeitar um tempo mínimo de cura de 91 dias, de modo a evitar uma cura adicional do concreto durante o ensaio, como apontado por Thomas *et al.* (2018). Após tal idade, Liu *et al.* (2017c) demonstraram que a evolução da hidratação não é tão significativa.

A exceção para a cura de 91 dias foi para o ensaio de resistência à compressão axial, também realizado para o concreto com 28 dias de idade, curado em câmara úmida. Tal situação foi considerada para caracterizar os concretos e verificar a eficiência do diagrama de dosagem (Figura 19). Foram rompidos três corpos de prova para cada combinação do tipo de cimento e faixa de resistência. Os dados referentes à ruptura à compressão axial dos corpos de prova de concreto estão expostos na Figura 20. A partir dos resultados, foi possível concluir que, aos 28 dias, as três classes de concreto estabelecidas durante a fase de planejamento foram obtidas, sendo de (25 ± 5) MPa, (35 ± 5) MPa e (45 ± 5) MPa para os três tipos de cimento. Com relação ao efeito da idade, assim como exposto por Liu *et al.* (2017c), os concretos que continham adição pozolânica apresentaram maior ganho de resistência aos 91 dias em comparação ao concreto sem adição. O maior ganho para o concreto com adição de 12,5% de cinza volante foi o da amostra IIZ-C35 (aumento de

20% na resistência à compressão axial com o aumento do tempo de cura) enquanto que para um concreto com um teor de 27% cinza volante, o maior aumento com a idade foi o da amostra IV-C25 (43,8%).

Figura 20 – Resultados de resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias de cura úmida das amostras de concreto



Fonte: O autor (2018)

Para verificar a efetividade da diferença entre as classes de concreto determinadas, foi realizada a análise de variância (ANOVA), com um nível de confiança de 95%, para as amostras dos três tipos de cimento e três faixas de resistência, comparando as idades de 28 e 91 dias de cura. Concluiu-se que houve diferença significativa entre as três classes de concreto para todos os tipos de cimento e as duas idades analisadas, de acordo com o planejamento experimental a partir do diagrama de dosagem elaborado. De maneira individual, para concretos moldados com cimento CPV-ARI, a idade não teve influência sobre os resultados de resistência à compressão, diferentemente do que ocorreu para as amostras moldadas com cimento CP-II-Z e CP-IV – confirmando o exposto por Liu *et al.* (2017c) e Sørensen e Poulsen (2017).

5.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Nesta seção, serão apresentados dois métodos de ensaio para caracterização do concreto em relação à absorção de água. Para cada procedimento, foram moldados 27 corpos de prova cilíndrico de concreto, sendo nove amostras para cada tipo de cimento e, destas, três referentes a cada faixa de resistência do concreto, conforme exposto na Tabela 9. Os CPs permaneceram em cura durante 91 dias em câmara úmida. Os ensaios de absorção foram realizados antes da exposição dos corpos de prova à solução contendo cloreto, evitando a influência do íon sobre as propriedades do material.

Tabela 9 – Quantidade de corpos de prova prevista para cada ensaio de caracterização do concreto por absorção de água

Classe de resistência	Tipo de cimento		
	Cimento CPV-ARI	Cimento CPII-Z	Cimento CPIV
C25	3	3	3
C35	3	3	3
C45	3	3	3

Fonte: O autor (2018)

Previamente à realização do ensaio, as amostras permaneceram em estufa a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante quatro dias, quando atingiram sua constância de massa, isto é, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas entre períodos de 24 horas foi inferior a 0,5% do menor valor obtido. A temperatura utilizada foi diferente da proposta pelas normas NBR 9779:1995 e ASTM C642 :2013 (105°C) pois os estudos de Pinto *et al.* (2018) e Yildirim *et al.* (2011) demonstraram que tal temperatura é demasiada elevada, o que resulta em alta tensão interna no concreto. Essa tensão é resultante da expulsão da água no interior do material, o que pode causar fissuramento interno. Para cada tipo de cimento utilizado, o tempo necessário para a constância de massa foi diferente, porém, para fins de comparação, foi adotado o maior tempo demandado para a secagem das amostras – que, para este estudo, ocorreu para as amostras contendo CPV-ARI.

5.3.1. Absorção do concreto por capilaridade – ABNT NBR 9779:1995

Para verificar a absorção capilar de água pelo concreto, os corpos de prova (27) foram colocados em um recipiente e posicionados de modo a garantir que sua face inferior ficasse em contato com a água, conforme indicado pela norma ABNT NBR 9779:1995. A primeira etapa do ensaio considera o preenchimento do recipiente com água até um nível de 5 ± 1 mm acima da face inferior da amostra, mantido constante ao longo de todo o ensaio, conforme indicado na Figura 21.

Figura 21 – Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: O autor (2018)

A partir dessa configuração, os corpos de prova tiveram sua massa aferida com 3, 6, 24, 48 e 72 horas após o início do ensaio, em condição de superfície seca, garantida com o auxílio de um pano seco. Após a última medida de massa, as amostras foram rompidas axialmente para anotação da altura capilar no interior do concreto, conforme Figura 22.

O resultado de absorção de água por capilaridade é expresso em função da massa absorvida dividida pela área da superfície em contato com o líquido. Dessa forma, de acordo com a norma, a Equação 7 descreve essa relação.

Figura 22 – Ruptura da amostra cilíndrica para leitura de altura capilar (em mm) da água absorvida pelo concreto



Fonte: O autor (2018)

$$A_{cap} = \frac{m_f - m_i}{S} \quad \text{Equação 7}$$

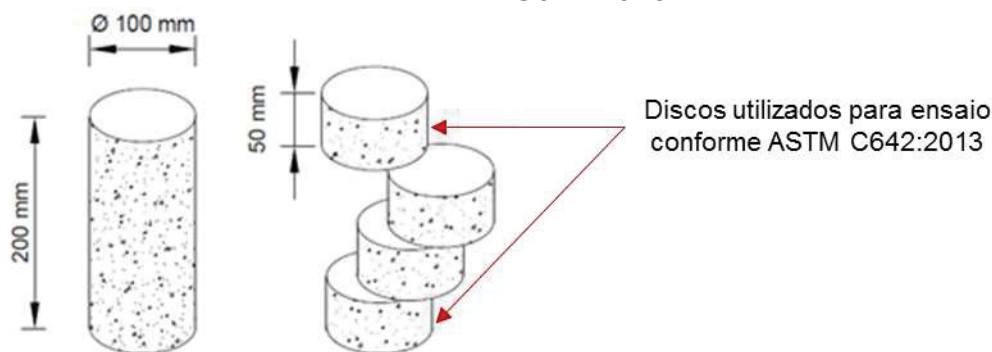
Onde A_{cap} é a absorção de água por capilaridade (g/cm^2), m_f é a massa da amostra após o período em contato com a água, m_i é a massa da amostra seca em estufa e S é a área da superfície exposta à água.

5.3.2. Absorção do concreto por imersão – ASTM C642:2013

Além das 27 amostras cilíndricas de concreto ensaiadas conforme a norma americana ASTM C642:2013, foram outras 27 amostras de mesmos traços (faixas de resistência e tipos de cimento) e com dimensões de $\varnothing 100 \times 50$ mm (disco) para serem ensaiadas pelo mesmo método de absorção por imersão, de modo a verificar a influência da geometria da amostra de concreto nos resultados. Tais discos são originários dos cortes realizados nos corpos de prova previstos para o ensaio de migração de cloreto conforme a norma, também americana, ASTM C1202:2017 (capítulo 5.4.1). Uma vez que esta norma recomenda a utilização dos discos referentes à região central de um corpo de prova de dimensão $\varnothing 100 \times 200$ mm, utilizou-se dos discos externos (topo e base do cilindro) para o ensaio de absorção (uma vez que seriam

descartados segundo a norma de ensaio de cloreto), conforme indicado na Figura 23.

Figura 23 – Indicação dos discos de concreto utilizados para ensaio conforme a norma ASTM C642:2013



Fonte: O autor (2018)

Considerando a origem das duas normas (ASTM C1202:2017 e ASTM C642:2013) – e de modo a correlacioná-las – optou-se por não utilizar a norma brasileira ABNT NBR 9778:2009, também referente a um método de análise de absorção de água por imersão. Nesse sentido, é possível verificar se há influência da geometria do corpo de prova de concreto sobre o resultado de absorção por imersão, além de reciclar os discos de concreto que seriam descartados.

Para avaliar a absorção de água por imersão pelo concreto, as amostras tiveram sua massa seca aferida e foram totalmente submersas em um recipiente preenchido com água (Figura 24). A variação de massa das amostras foi registrada em intervalos de 24 horas, em condição saturada superfície seca, até o momento em que a variação entre os valores de massa aferidos foi inferior a 0,5% do menor valor. O ensaio teve duração de quatro dias.

Na Equação 8 é apresentada a representação da absorção de água por imersão (A_{im}), expressa em percentual e função da massa da amostra seca (m_i) e da amostra saturada (m_f).

$$A_{im} = \left(\frac{m_f - m_i}{m_i} \right) \times 100$$

Equação 8

Figura 24 – Corpos de prova cilíndricos (esquerda) e discos (direita) de concreto imersos em água para análise da absorção por imersão



Fonte: O autor (2018)

5.4. ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Nesta seção, serão apresentados os métodos de ensaios preconizados por normas para a análise do cloreto no interior do concreto. São consideradas, pelo menos, três amostras de cada traço (combinação de tipo de cimento e classe de resistência do concreto), independente da geometria do corpo de prova sugerido pela norma. Na Tabela 10, estão resumidas as quantidades de corpos de prova moldados em função do traço e do método de ensaio de penetração de cloreto.

Tabela 10 – Resumo da quantidade de corpos de prova cilíndricos de concreto em função do método de ensaio de penetração de cloreto

ASTM C1202, NT BUILD 492, NT BUILD 443				AASHTO T259			
Cilindro Ø 100 x 200 mm*				Prisma 250 x 250 x 90 mm			
Classe de resistência	Tipo de cimento			Classe de resistência	Tipo de cimento		
	Cimento CPV-ARI	Cimento CPII-Z	Cimento CPIV		Cimento CPV-ARI	Cimento CPII-Z	Cimento CPIV
C25	2	2	2	C25	3	3	3
C35	2	2	2	C35	3	3	3
C45	2	2	2	C45	3	3	3

*Os corpos de prova foram cortados no sentido transversal conforme a geometria solicitada no método de ensaio.

Fonte: O autor (2018)

A norma americana ASTM C1202:2017 “*Electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration*” é uma referência utilizada para investigação rápida da resistência do concreto à penetração de cloreto através de leituras constantes de uma corrente elétrica aplicada ao corpo de prova, correlacionando a carga total passante à qualidade do concreto.

A norma NT BUILD 492:1999, intitulada “*Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*” apresenta o coeficiente de migração do cloreto no concreto no estado não estacionário. O ensaio, assim como a norma ASTM C1202:2017, utiliza um potencial elétrico externo aplicado a solução contendo cloreto, a fim de acelerar a penetração do íon no interior do concreto.

O ensaio de longa duração para análise de penetração de cloreto foi realizado com base na norma americana AASHTO T259:1980, “*Resistance of concrete to chloride ion penetration*”. Foram moldados 3 corpos de prova prismáticos (250 x 250 x 90 mm) para cada tipo de cimento e faixa de resistência de concreto, resultando num total de 27 amostras. Para permitir uma comparação com os demais ensaios de penetração de cloretos no concreto, entretanto, as amostras prismáticas permaneceram em câmara úmida durante 91 dias, diferente do sugerido pela AASHTO T259, que prevê um período de cura de apenas 14 dias. Isso causa uma implicação direta na hidratação do concreto (CASCUDO, 1997; THOMAS *et al.*, 2018).

Paralelo ao estudo de difusão natural do cloreto no interior do concreto proposto pela norma americana AASHTO T259:1980, a norma finlandesa NT BUILD 443:1995 (*Accelerated chloride penetration*) também prevê o cálculo do coeficiente de difusão do cloreto no concreto. No entanto, a solução de NaCl para a exposição das amostras possui uma concentração superior, de 16,5%, em comparação à norma americana, de 3%.

Na Tabela 11, é apresentado um resumo das condições adotadas neste estudo para cada ensaio.

Tabela 11 – Resumo das condições adotadas para cada ensaio

Norma	ASTM C1202	NT BUILD 492	AASHTO T259	NT BUILD 443
Ano	2017	1999	1980	1995
Geometria (mm)	Cilíndrico Ø100 x 50	Cilíndrico Ø100 x 50	Prismático 250 x 250 x 90	Cilíndrico Ø100 x 130
Tempo de cura sugerido por norma (dias)	28	Não especificado	14	28
Cura adotada	Cura durante 91 dias em câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura média de 25°C			
Condição da amostra	Saturada	Saturada	Umidade relativa: 50%	Saturada
Tempo de exposição	6 horas	6 - 96 horas	90 dias	> 35 dias
Temp. (°C) sugerida por norma	20 - 25	20 - 25	Não especificado	21 - 25
Tensão aplicada (V)	60 ± 0,1	25 a 60	Não há	Não há
Solução de cloreto (Cl ⁻)	3% NaCl	11,1% NaCl	3% NaCl	16,5% NaCl
Ânodo	12g NaOH 1000g H ₂ O	12g NaOH 1000g H ₂ O	Não há	Não há
Análise	Corrente elétrica (Δ 30 min)	Corrente elétrica e temperatura / Aspersão de AgNO ₃	Teor de Cl ⁻ por profundidade do concreto	Teor de Cl ⁻ por profundidade do concreto
Parâmetro de saída	Análise qualitativa da resistência à penetração de Cl ⁻	Coefficiente de migração de Cl ⁻ (estado não estacionário)	Perfil de Cl ⁻ totais (massa de cimento)	Perfil de Cl ⁻ (massa de concreto)

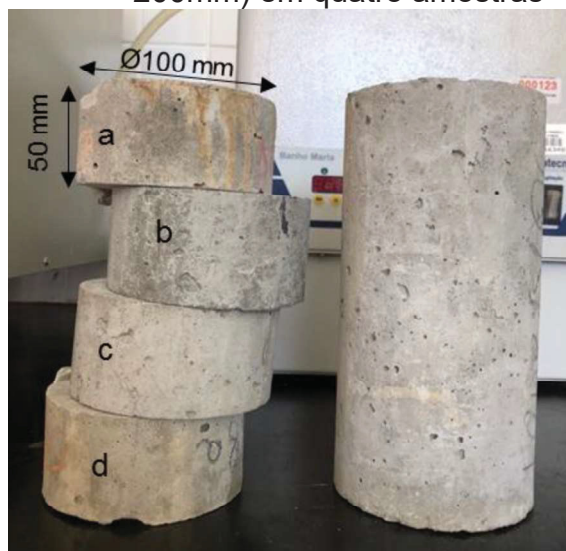
Fonte: O autor (2018)

5.4.1. ASTM C1202:2017

Para realização do método de ensaio conforme a norma ASTM C1202:2017 (também conhecida como “ensaio de migração acelerado”), foram preparadas amostras cilíndricas de concreto, com 100 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento (Figura 25). Para análise das nove combinações de concreto (três tipos de cimento e três faixas de resistência do concreto), foram utilizados 18 corpos de prova cilíndricos (Ø 100 x 200 mm), isto é, dois CPs por traço. Destes corpos de prova, foram extraídas quatro fatias de cada amostra, com as dimensões propostas por norma, com o auxílio de uma serra circular para corte de concreto. O topo e a base (amostras a e d) do corpo de prova

cilíndrico foram utilizados para a ensaio de absorção (capítulo 5.3.2); dessa forma, apenas os dois discos centrais (b e c) foram utilizados no ensaio de migração. No total, pelo menos três discos para cada combinação foram ensaiados, totalizando 27 discos de concreto (\varnothing 100 mm x 50 mm).

Figura 25 – Representação da divisão de um corpo de prova cilíndrico (\varnothing 100 x 200mm) em quatro amostras



Fonte: O autor (2018)

Após o corte em fatias, os corpos de prova foram selados no entorno do seu comprimento com silicone para impermeabilização, mantendo as faces resultantes do corte com a serra livres, de modo a garantir um fluxo unidirecional durante o ensaio. Ao mesmo tempo, foram montadas as células para ensaio, utilizando um molde em acrílico, com 280 dm³ de capacidade volumétrica cada. Foi, ainda, prevista a passagem dos cabos para aplicação da diferença de potencial na solução, presos a uma placa de cobre, a qual permanece submersa durante o ensaio. Para cada célula em acrílico, é previsto o preenchimento com soluções de cátodo e ânodo. De modo a garantir a estanqueidade do concreto entre os moldes de acrílico, foi utilizado silicone para vedação, aguardando um período total de cura do material de, pelo menos, 24 horas

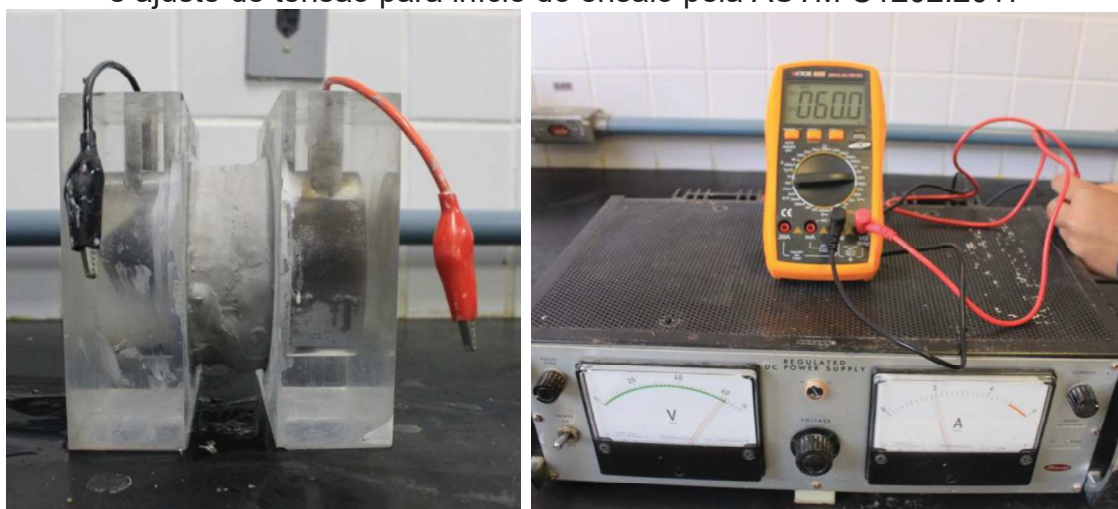
Com as células montadas e o corpo de prova de concreto vedado, todos os moldes foram preenchidos com água, para verificar se há vazamento

e garantir a saturação das amostras nas células. O procedimento foi estabelecido em 24 horas, conforme realizado por Medeiros *et al.* (2012).

Após o período de saturação, foram preparadas duas soluções: uma solução contendo 3% de cloreto de sódio (NaCl) em massa e outra com 0,3 N de hidróxido de sódio (Na(OH)), equivalente a 12 g de Na(OH) por litro de água destilada. Um dos moldes em acrílico foi preenchido com solução do cátodo (NaCl), enquanto o outro molde foi preenchido com solução do ânodo (Na(OH)). Isso contribui para que o cloreto penetre no concreto, considerando que um potencial negativo será aplicado na solução contendo o íon, forçando-o a migrar para a solução com potencial positivo.

Com as soluções em contato com cada face do corpo de prova, os cabos foram conectados com as respectivas polaridades da fonte de energia, mantendo uma tensão constante de $60 \pm 0,2V$. Na Figura 26, é apresentado o esquema de preparo da amostra e o ajuste de tensão.

Figura 26 – Configuração da amostra selada com silicone na célula de acrílico e ajuste de tensão para início do ensaio pela ASTM C1202:2017



Fonte: O autor (2018)

Tendo iniciado a aplicação da tensão nas amostras, foram realizadas leituras de corrente elétrica na solução do ânodo, com o auxílio de um multímetro. As leituras são registradas em intervalos de 30 minutos durante 6 horas e a corrente total que passa nas amostras durante o ensaio é calculada a partir da Equação 9, onde Q é a carga passante, em Coulomb e I_t é a corrente

(em ampère) no tempo t (minutos), sob aplicação de tensão. O resultado é comparado com os valores de referência da norma, indicando a resistência do concreto à penetração do cloreto, conforme indicado na Tabela 12.

$$Q = 900 * (I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{300} + 2 I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 9}$$

Tabela 12 – Referência de resistência do concreto à penetração de cloreto

Carga passante (Coulomb)	Penetrabilidade do íon cloreto
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Negligenciável

Fonte: ASTM C1202: 2017

Após o término de exposição nas soluções, as amostras foram divididas ao meio, perpendicularmente às superfícies de exposição, com o auxílio de uma prensa. Uma solução de 0,1M/L de nitrato de prata (AgNO_3) foi aspergida sobre as amostras recém rompidas, de modo a identificar a profundidade de cloreto penetrada no concreto – a reação produz o cloreto de prata (AgCl), um precipitado esbranquiçado, conforme exposto na Figura 27.

Figura 27 – Aspersão de solução contendo AgNO_3 nas amostras após finalização do ensaio de migração



Fonte: O autor (2018)

5.4.2. NT BUILD 492:1999

Para o ensaio de acordo com o método estabelecido pela norma NT BUILD 492:1999 (*Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*), foram preparados 18 corpos de prova cilíndrico (2 CPs para cada traço), dos quais foram extraídas quatro fatias de cada amostra (\varnothing 100 x 50 mm). As condições de utilização e quantidades das amostras cortadas de concreto em função do tipo de cimento e faixa de resistência de concreto, bem como período de cura, foram as mesmas estabelecidas para o ensaio da ASTM C1202:2017 (Figura 25).

Para a montagem do aparato de suporte para o posicionamento de cada amostra, foi utilizado uma folha de acetato para envolver a amostra e conter a solução de 0,3 N de Na(OH), fixada ao concreto com o auxílio de silicone e elástico de borracha, com o intuito de evitar a mistura com a solução catódica (11,1% NaCl). Foi utilizado um suporte de madeira para garantir a inclinação de 32° do corpo de prova, conforme proposto pela norma (Figura 28).

Figura 28 – Esquema de preparo do corpo de prova e suporte de madeira para garantir a inclinação prevista para o ensaio da norma NT BUILD 492:1999

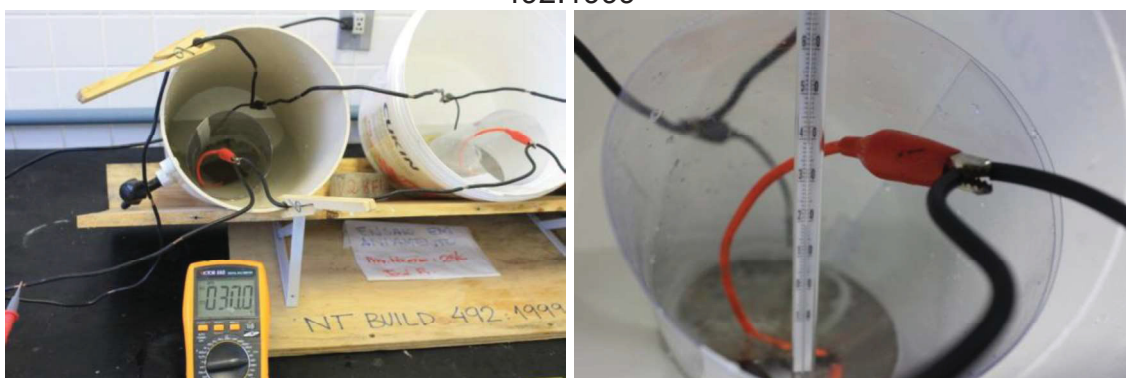


Fonte: O autor (2018)

Para este estudo, a tensão aplicada variou de 25 V a 60 V. Segundo a norma NT BUILD 492:1999, para as tensões aplicadas, a duração total do

ensaio deve ser de 24 horas. Na Figura 29, é apresentada a configuração utilizada para realização do ensaio, com o multímetro marcando uma tensão de 30 V. Após o período de exposição, a solução anódica (NaOH) tem sua temperatura aferida, bem como a corrente de todo o sistema.

Figura 29 – Configuração do ensaio de corpo de prova de concreto e aferição da temperatura na solução anódica, de acordo com a norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

De acordo com a norma, para esta tensão, é verificada a corrente que passa nas amostras, necessária para ajustar a tensão na qual o ensaio deverá transcorrer (Tabela 13).

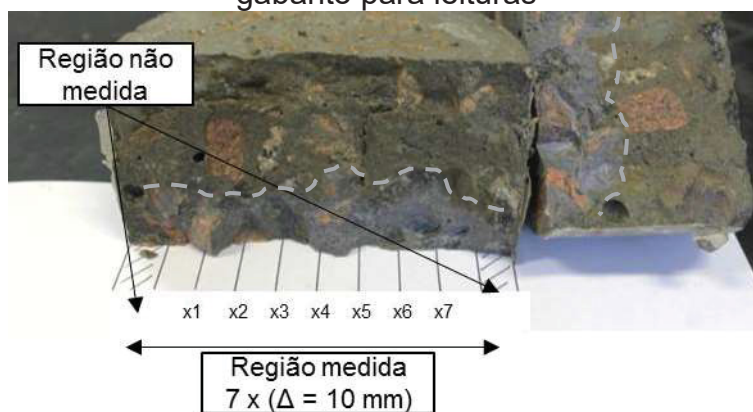
Tabela 13 – Duração do ensaio e ajuste de tensão em função da corrente medida para uma tensão inicial de 30V

Corrente inicial com tensão de 30 V (mA)	Tensão aplicada após ajuste (V)	Possível nova corrente (mA)	Duração do ensaio (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: Traduzido de NT BUILD 492:1999

O cálculo do coeficiente de migração do cloreto se dá a partir da medição da penetração do íon no interior do concreto, evidenciado pela precipitação após aplicação de solução de 0,1 M de AgNO_3 na amostra recém fraturada, similar ao procedimento utilizado para a norma ASTM C1202:2017 (ver Figura 27). Na Figura 30 está evidenciado o esquema de leitura de penetração do íon, onde são sugeridas 7 leituras de profundidade após a precipitação de AgCl . Essas leituras correspondem à região interna da amostra, descartando-se os primeiros 10 mm mais próximos à superfície, sendo os 80 mm de amostra restantes divididos em intervalos de 10 mm.

Figura 30 – Medida de penetração de cloreto após aspersão de AgNO_3 com gabarito para leituras



Fonte: O autor (2018)

O coeficiente de migração no estado não estacionário (D_{ns}) pode então ser calculado a partir da Equação 10, Equação 11 e Equação 12.

$$D_{ns} = \frac{R T}{z F E} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad \text{Equação 10}$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad \text{Equação 11}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{R T}{z F E}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 c_d}{c_0} \right) \quad \text{Equação 12}$$

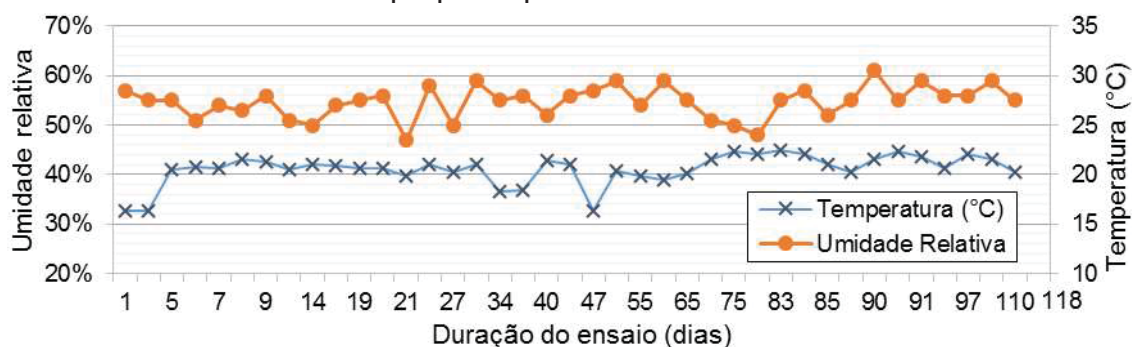
Onde: R é a constante dos gases (8314 J/K.mol), T é a média das temperaturas lidas na solução anódica (em Kelvin), z é o valor absoluto da valência do íon (para cloreto, $z = 1$), F é a constante de Faraday (9648×10^4

J/V.mol), x_d é a média dos valores medidos de penetração (em metros), t é o tempo (em segundos), U é o valor absoluto da tensão aplicada (em volts), L é a espessura da amostra (em metros), erf^{-1} é o inverso da função erro, c_d é a concentração de cloretos na qual o concreto altera sua coloração (aproximadamente 0,07 N para concreto sem adição) e c_0 é a concentração de cloreto na solução catódica (aproximadamente 2 N).

5.4.3. AASHTO T259:1980

Para o ensaio conforme a norma americana AASHTO T259:1980 (*Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration*), as 27 amostras prismáticas de concreto foram, após o período de cura em câmara úmida, alocadas em câmara seca, com umidade e temperatura controlados (respectivamente $55 \pm 3\%$ e $20 \pm 2^\circ\text{C}$), durante 28 dias. Considerando que as amostras permanecem em câmara seca durante todo o tempo do ensaio (90 dias), os dados foram monitorados durante 118 dias, contemplando o período de condicionamento e o período de exposição das amostras, apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Variação da temperatura e da umidade relativa da câmara seca durante o ensaio proposto pela norma AASHTO T259:1980



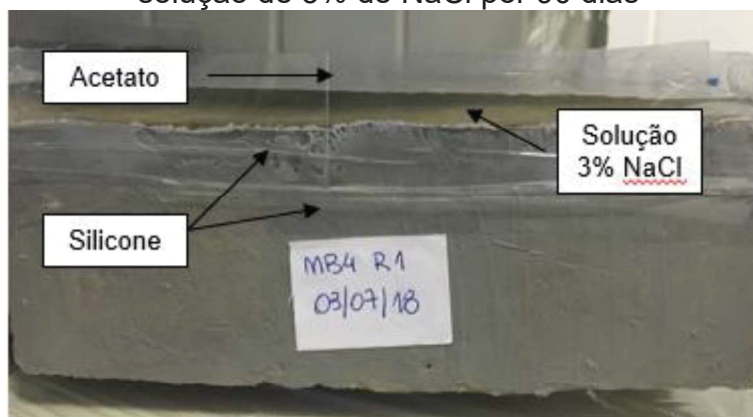
Fonte: O autor (2018)

Uma solução contendo 3% de cloreto de sódio (NaCl) foi preparada e, a fim de conter essa solução, uma estrutura de acetato foi montada sobre a

área de concreto (250 x 250 mm) que ficou em contato com o fundo da fôrma ao final da moldagem; tal área foi selecionada por ser a melhor adensada e garantir maior regularização entre as amostras. Além disso, cada prisma de concreto teve suas laterais (dimensões com altura de 90 mm) seladas com silicone, mantendo as dimensões com maiores áreas (250 x 250 mm) livres, de modo a garantir um fluxo unidirecional da solução percolando pelo material.

Por fim, a região limitada pela contenção de acetato foi preenchida com a solução de cloreto até uma altura de 13 ± 1 mm sobre a amostra de concreto, exposto durante 90 dias. As amostras foram cobertas superficialmente com plástico filme para evitar a rápida evaporação da solução. Na Figura 32 é apresentado uma amostra recém preparada para a exposição à solução de cloreto de sódio.

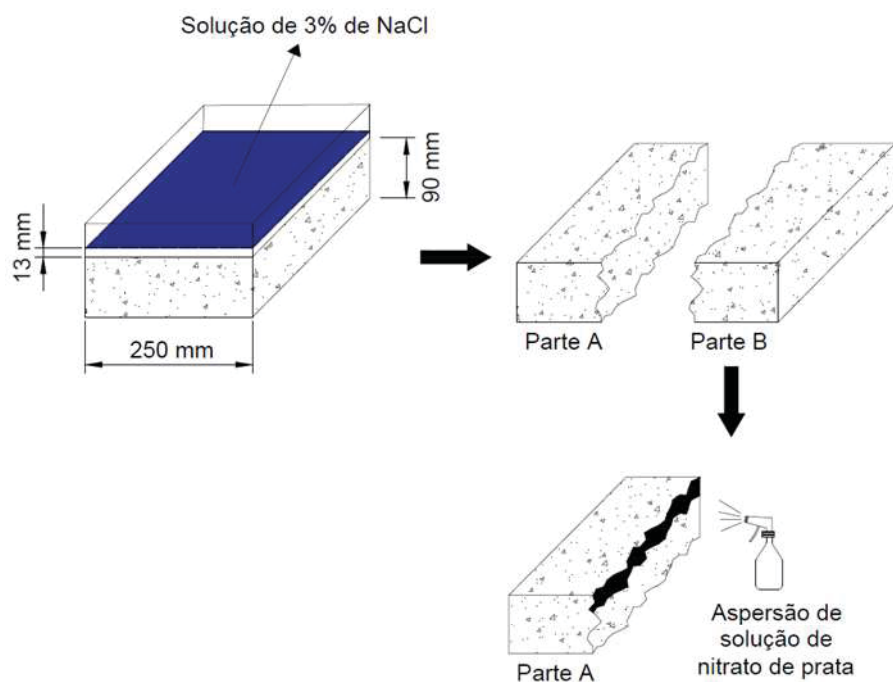
Figura 32 – Esquema do corpo de prova prismático preparado para conter a solução de 3% de NaCl por 90 dias



Fonte: O autor (2018)

Após o tempo em exposição, cada prisma foi seccionado ao meio com o auxílio de duas barras de aço e uma prensa hidráulica, sendo que, em uma metade do corpo de prova, foi aspergida uma solução de 0,1M de nitrato de prata (parte A), conforme apresentado na Figura 33 e na Figura 34. As leituras de precipitação de AgNO_3 seguiram o método proposto pela norma NT BUILD 492:1999, descrito anteriormente.

Figura 33 – Representação esquemática de análise de concreto após exposição a solução de cloreto, conforme AASHTO T259:1980



Fonte: O autor (2018)

Figura 34 – Demarcação do corpo de prova prismático para divisão e ruptura ao meio



Fonte: O autor (2018)

Para aspersão da solução de AgNO_3 , foram seguidos os mesmos procedimentos aplicados nos métodos anteriormente apresentados. A partir das leituras de profundidade de penetração do cloreto (visível através da precipitação de AgCl), realizadas de acordo com o proposto pela norma NT

BUILD 492:1999 (Figura 30), é possível calcular o coeficiente de penetração do cloreto, expresso em função da razão da profundidade de penetração (mm) pela raiz do tempo (semanas). O parâmetro é sugerido por Wee *et al.* (2000) *apud* Schneider (2005).

A norma AASHTO T259:1980 sugere que sejam coletadas amostras de concreto com profundidade de 0,5 polegada (12,5 mm) para a determinação do perfil de cloreto. Entretanto, neste trabalho foi utilizado apenas o método colorimétrico para análise da penetração de cloreto no concreto.

5.4.4. NT BUILD 443:1995

Para o ensaio conforme a NT BUILD 443:1995 (*Concrete, hardened: accelerated chloride penetration*), foram moldados 18 corpos de prova cilíndricos (\varnothing 100 x 200 mm), que, após a cura em câmara úmida por 91 dias, foram cortados perpendicularmente ao seu eixo, resultando em 18 amostras de \varnothing 100 mm x 130 mm. Atenta-se que, para este ensaio, foram disponibilizadas apenas duas amostras para cada traço de concreto.

Previamente à exposição na solução de NaCl, tais amostras permaneceram imersas em solução saturada de hidróxido de cálcio até variação de massa inferior a 0,1% em um intervalo de 24 horas, conforme Figura 35.

Figura 35 – Amostras imersas em solução saturada de hidróxido de cálcio



Fonte: O autor (2018)

Após a saturação, os corpos de prova que apresentaram falhas no adensamento foram regularizados com silicone e selados com resina a base de esmalte sintético em todas as suas faces, exceto a superfície resultada do corte, que permaneceu livre para contato com a solução. Na Figura 36 são apresentados os preparos realizados nas amostras.

Figura 36 – Preparo das amostras cilíndricas com esmalte sintético



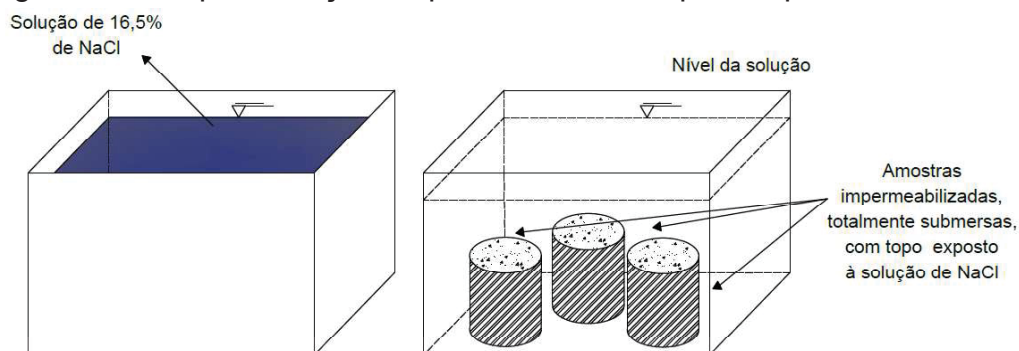
Fonte: O autor (2018)

Após o período de cura do material selante, as amostras foram imersas em solução de 16,5% de NaCl durante 90 dias. Esta norma, no entanto, prevê um período de exposição de, pelo menos, 35 dias; o tempo estabelecido de 90 dias para este estudo permite uma comparação mais próxima ao ensaio da AASHTO T259:1980 (também sem aplicação de tensão externa), sendo que, além do método de exposição, a geometria das amostras e a concentração salina da solução são as principais diferenças entre os métodos. Na Figura 37 está apresentado um esquema da condição de exposição das amostras conforme previsto na NT BUILD 443:1995.

Assim como para os resultados da norma AASHTO T259:1980 (capítulo 5.4.3), das amostras ensaiadas conforme a norma NT BUILD 443:1995 prevê-se a extração de camadas de concreto para elaboração do perfil de cloreto. Neste estudo, a análise baseou-se apenas no ensaio colorimétrico de aspersão de nitrato de prata, conforme método exposto na norma NT BUILD 492:1999. Dessa maneira, os corpos de prova foram seccionados longitudinalmente, aspergindo-se solução de AgNO_3 a 0,1 mol/L nas áreas recém fraturadas para a determinação da frente de penetração do

cloreto a partir da precipitação de cloreto de prata (AgCl). Da outra metade dos corpos de prova de classe C35 foram extraídas amostras para os ensaios de microestrutura. Na Figura 38 são apresentados tais procedimentos.

Figura 37 – Representação esquemática dos corpos de prova submersos



Fonte: O autor (2018)

Figura 38 – Procedimentos realizados nas amostras de concreto após exposição a solução de 16,5% de NaCl, conforme previsto pela norma NT BUILD 443:1995



Fonte: O autor (2018)

5.5. ENSAIOS COMPLEMENTARES

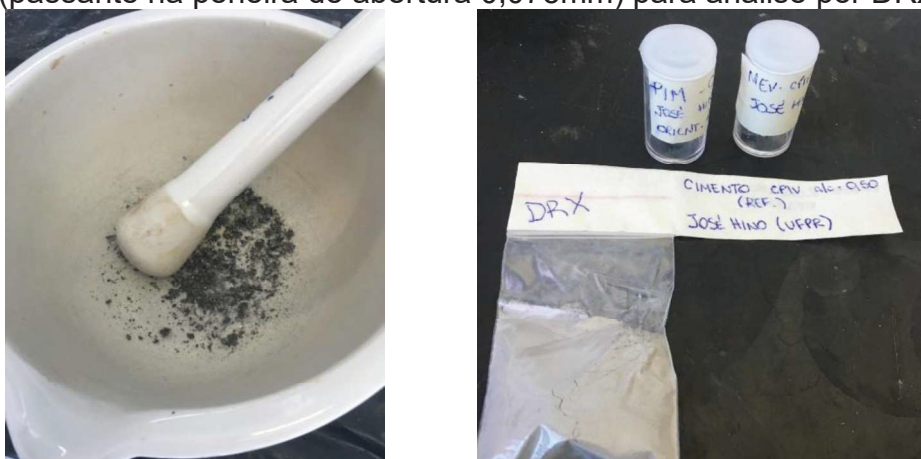
A fim de complementar os resultados provenientes dos ensaios de penetração de cloreto no concreto, foram previstos os ensaios de microestrutura através das técnicas de difração de raios X, porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura.

5.5.1. Difração de Raios X (DRX)

Foram preparadas 6 amostras de concreto classe C35 (3 para cada tipo de cimento), das quais 3 foram tomadas como referência (preparadas após 91 dias de cura em câmara úmida) e 3 foram preparadas após o término do ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999 (solução em concentração de 11,1% NaCl). A escolha da faixa de resistência intermediária deste estudo, de 35 MPa, foi tal devido à possibilidade de haver maior penetração do cloreto no concreto durante os ensaios – tanto acelerados quanto naturais –, porém com uma relação água/cimento não muito elevada como a que foi apresentada pelos concretos de classe 25 MPa.

As amostras para análise por DRX foram obtidas a partir da extração de pequenos fragmentos de concreto dos corpos de prova com o auxílio de uma talhadeira. Após obter material suficiente, os fragmentos foram moídos com um almofariz e passados na peneira #200 (malha de abertura de 0,075 mm), até alcançar uma massa de, aproximadamente, 10 gramas de pó. Na Figura 39 estão ilustrados a amostra em processo de moagem e o material resultante (pó) armazenado e identificado.

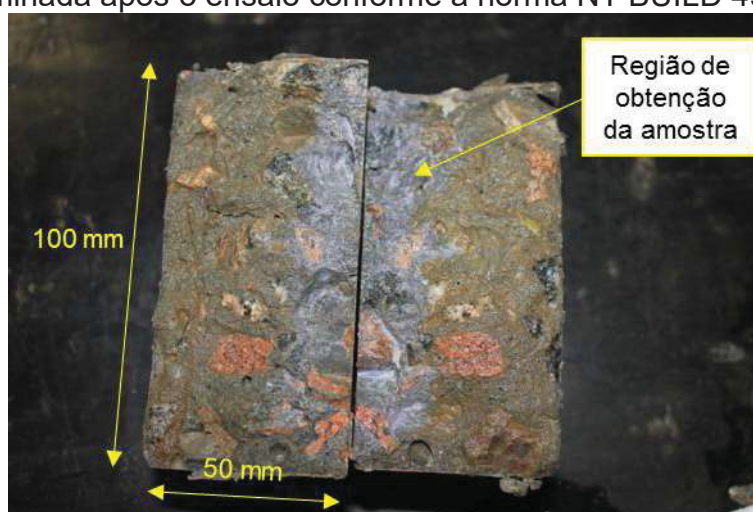
Figura 39 – Moagem de amostra de concreto e armazenamento do pó (passante na peneira de abertura 0,075mm) para análise por DRX



Fonte: O autor (2018)

Para as amostras que foram expostas à solução de NaCl, tomou-se cuidado para obtê-las a partir da face que ficou em contato com o cloreto, conforme representação da Figura 40. A aspersão de solução de AgNO_3 e consequente precipitação de AgCl confirmou a presença do íon na amostra (indicado pela seta).

Figura 40 – Região de coleta de amostra para análise de DRX em amostra contaminada após o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

As amostras de concreto (pó prensado) foram encaminhadas para análise no Laboratório Central de Análises, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Pato Branco. Os materiais foram analisados utilizando um difratômetro de Raios X *Rigaku*, modelo *Mini flex 600*, com fonte de Cu K α , sob tensão de 40 kV e corrente elétrica de 15 mA. O intervalo de análise foi determinado como sendo entre 5° e 55°, em varredura angular 2 θ e velocidade de varredura de 2° por minuto. A faixa de leitura das amostras foi baseada em alguns estudos (KOPECSKÓ, 2006; JO *et al.*, 2012; ROJAS *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2018) que apresentaram picos de sais de Friedel e Kuzel sempre em varreduras angulares inferiores a 55°. A identificação dos picos dos materiais analisados foi realizada por intermédio do software X'Pert HighScore, e comparada ao banco de dados do ICDD (*International Center for Diffraction Data*).

5.5.2. Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

A porosidade e a distribuição dos poros das amostras foram determinadas a partir de 9 amostras de concreto, com dimensão aproximada de 1 cm³ (10 mm de aresta). Para auxiliar na precisão de coleta das amostras, foi utilizada uma mini serra circular, conforme ilustrado na Figura 41, e tomando-se cuidado para não coletar amostra contendo agregado graúdo.

Figura 41 – Representação da amostra de concreto (1 cm³) e procedimento de coleta para ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio



Fonte: O autor (2018)

A fim de se possibilitar a comparação e a complementação dos resultados do ensaio de difração de raios X, as amostras ensaiadas por porosimetria por intrusão de mercúrio foram provenientes de corpos de prova classe 35 MPa (3 para cada tipo de cimento). Três amostras são tidas como “referência” (após o período de cura em câmara úmida), três foram extraídas após o procedimento de ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999 (solução em concentração de 11,1% NaCl) e outras três foram obtidas após o período de exposição em concentração de 16,5% de NaCl proposto pela norma NT BUILD 443:1995. Para estes dois últimos métodos, atentou-se à coleta do material da região da amostra próxima à face que ficou em contato com o cloreto, para garantir a análise do material contendo o íon.

Após o preparo do material, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). As amostras foram ensaiadas em um porosímetro por intrusão de mercúrio modelo *Micromeritics AutoPore IV 9500*.

5.5.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

Para análise de imagem, foram preparadas 12 amostras extraídas dos corpos de prova de concreto após as seguintes etapas (1) cura em câmara úmida durante 91 dias; (2) ensaio de migração de cloreto conforme a norma NT BUILD 492:1999 (solução em concentração de 11,1% NaCl); (3) ensaio de difusão natural, conforme a norma AASHTO T259:1980 (solução em concentração de 3% de NaCl); e (4) exposição a solução salina (16,5% NaCl) de acordo com a norma NT BUILD 443:1995. Para as quatro etapas, foram coletadas amostras de concreto classe C35 (assim como para os ensaios de DRX e PIM), sendo três para cada etapa, representando cada tipo de cimento.

As análises foram feitas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU, com resolução de 3 nm, conforme indicado na Figura 42. A determinação da composição química por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizada através de um equipamento com sistema de análise química tipo EDS (*Oxford*), com software AZ Tech (*Advanced*) e detector tipo SDD de 80 mm².

Tanto para gerar os espectros quanto as imagens, as amostras utilizadas foram preparadas a partir de fragmentação (superfície de fratura) dos corpos de prova de concreto com uma talhadeira, sem uma precisão geométrica pré-determinada, porém evitando-se utilizar fragmentos contendo agregado graúdo. Para as amostras que tiveram contato com solução de NaCl, atentou-se à coleta de material próximo às regiões que ficaram expostas ao cloreto. Para análise através de MEV, as amostras foram metalizadas superficialmente com ouro.

Figura 42 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado para gerar imagens de microestrutura das amostras de concreto



Fonte: CME-UFPR (2018)

5.6. ANÁLISE ECONÔMICA E DE VIDA ÚTIL

Por meio dos resultados de dosagem dos diferentes concretos (variando o teor de cinza volante e a classe de resistência), foram realizadas duas análises referentes ao material: econômica (em relação ao custo de produção do concreto) e de vida útil (referente à durabilidade).

Os custos dos materiais utilizados foram obtidos a partir do fabricante dos três tipos de cimento e da consulta da tabela do Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da Construção Civil (SINAPI). Ambas as bases de referência foram consultadas no mês de janeiro de 2019. Os valores dos materiais são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Custo unitário dos materiais utilizados para dosagem

Descrição	Unidade	Custo unit.
Cimento Portland CP-V ARI - alta resistência inicial (50 kg)	Kg	R\$ 22,34
Cimento Portland composto CP II-Z-32 (50 kg)	Kg	R\$ 19,07
Cimento Portland pozolânico CP IV- 32 (50 kg)	Kg	R\$ 19,07
Areia grossa - posto jazida/fornecedor, sem transporte	m ³	R\$ 54,00
Pedra britada (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	m ³	R\$ 40,59
Aditivo superplastificante de pega normal para concreto (200 kg)	Kg	R\$ 1.656,55

Fonte: Fornecedores / SINAPI (2019)

Com base no estudo de Berke e Hicks (1992), a partir da Equação 13, os resultados de carga passante nas amostras de concreto provenientes do ensaio de migração acelerado (ASTM C1202:2017) foram utilizados para estimar o coeficiente de difusão aparente de cloreto (C_{da}).

$$C_{da} = 0,0103 * 10^{-8} * Q^{0,84} \quad \text{Equação 13}$$

Através da adaptação da 2ª Lei de Fick (Equação 14), foi possível fazer uma estimativa de vida útil (VU) proposta para cada tipo de concreto.

$$C_{CL} = C_S * [1 - \operatorname{erf}(\frac{PC}{2 * \sqrt{D * t}})] \quad \text{Equação 14}$$

Onde, C_{CL} é a concentração de cloreto necessária para despassivação do aço (adotada como 0,4%), C_S é a concentração superficial de cloreto no concreto (%), PC é a profundidade do concreto na qual a C_{CL} é atingida (cm), D é o coeficiente de difusão do cloreto (cm^2/s), e t é o tempo (anos).

A concentração superficial utilizada foi baseada na recomendação do manual do software Life-365 (Thomas e Bentz, 2002), sendo de 0,6% para representar uma estrutura em ambiente marinho distante 800 metros do mar. Os valores de cobrimento da armadura adotados foram de 4 e 5 cm, de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014, para ambientes de agressividade ambiental forte e muito forte.

5.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos resultados obtidos em todos os ensaios se deu a partir da análise de variância (ANOVA), com fator duplo e repetição. Quando os resultados apresentaram valores similares ou dentro do intervalo do desvio padrão, as amostras foram comparadas par a par através da ANOVA com fator único e confirmada através da comparação múltipla de médias.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as discussões a partir dos resultados obtidos dos experimentos realizados pelo planejamento experimental (Capítulo 5). Com os valores obtidos de cada ensaio, também foi possível realizar correlações, verificando a compatibilidade entre os ensaios.

6.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

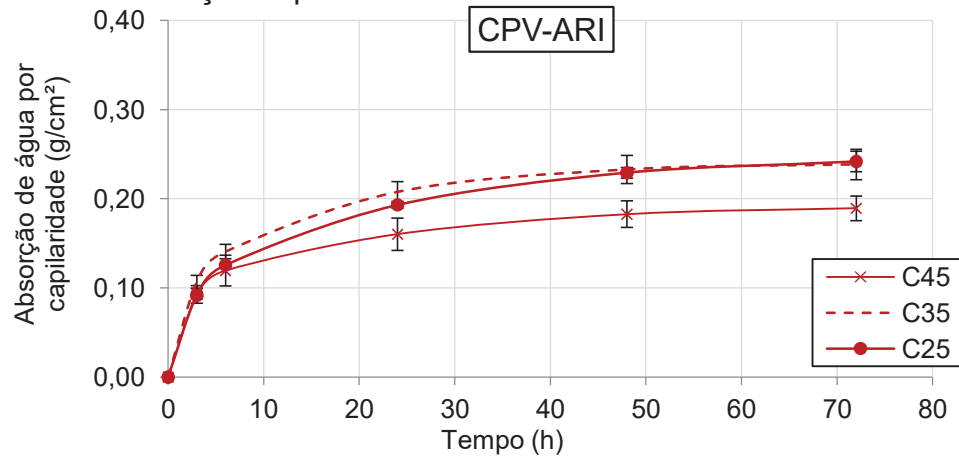
Os ensaios de caracterização do concreto foram baseados na capacidade do material em absorver líquido, tendo como principal objetivo verificar um dos principais mecanismos de ingresso do cloreto no interior do material, segundo Yuan e Santhanam (2012). A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade (amostras cilíndricas) e absorção por imersão (amostras cilíndricas e discos).

6.1.1. Absorção do concreto por capilaridade

A quantidade de água absorvida em função do tempo de exposição das amostras de concreto secas à lâmina de 5 mm de água é apresentada em função do tipo de cimento na Figura 43 (CPV-ARI), na Figura 44 (CPII-Z) e na Figura 45 (CPIV).

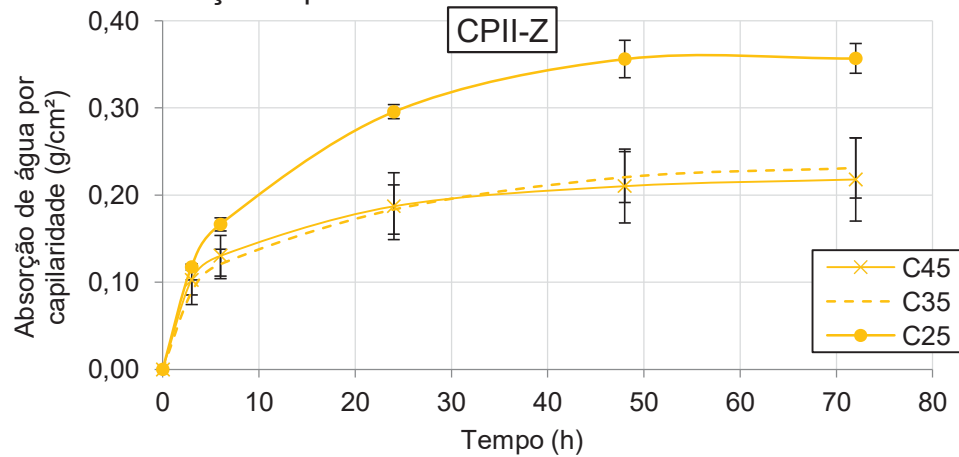
Concretos de classe C25 apresentaram a maior absorção por capilaridade, assim como concretos de classe C45 absorveram menor quantidade de água, mesmo considerando a variação do tipo de aglomerante – o que pode ser associado à porosidade dos materiais (classes de resistência mais baixas foram dosadas com maior relação água/aglomerante). Isso pode ser confrontado com o exposto por Dal Molin (2011), Aponte et al. (2012) e Medeiros-Junior *et al.* (2014) sobre a relação inversa da resistência à compressão com a porosidade do concreto.

Figura 43 – Absorção capilar do concretos moldados com cimento CPV-ARI



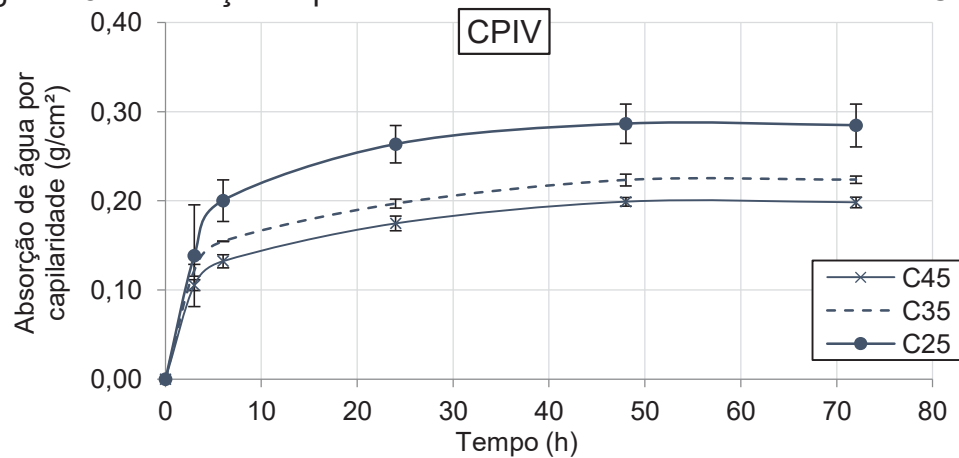
Fonte: O autor (2018)

Figura 44 – Absorção capilar dos concretos moldados com cimento CPII-Z



Fonte: O autor (2018)

Figura 45 – Absorção capilar dos concretos moldados com cimento CPIV



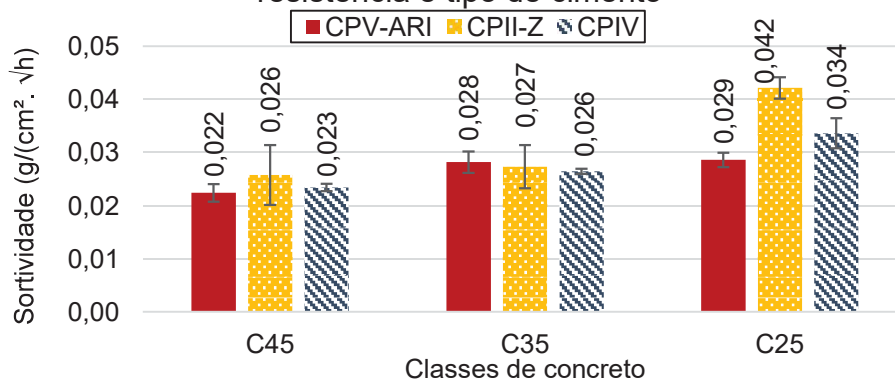
Fonte: O autor (2018)

Para correlacionar os valores de absorção por capilaridade e resistência à compressão (91 dias), foi analisada a sortividade (Equação 15).

$$S = \frac{V}{A \cdot \sqrt{t}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde: S é a sortividade ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$), V é o volume de água absorvido no ensaio (em g), A é a área de exposição da amostra à água (em cm^2), e t é o tempo de exposição (em h). Os resultados de sortividade por amostra (classe de resistência do concreto e tipo de cimento) são apresentados na Figura 46.

Figura 46 – Sortividade das amostras de concreto, em função da classe de resistência e tipo de cimento



Fonte: O autor (2018)

Foi realizada ANOVA com fator duplo (tipo de cimento e classe de resistência) a partir dos valores de sortividade, com grau de significância de 95%, apontando diferença estatística entre as amostras tanto em relação à classe de concreto quanto ao tipo de cimento, além da interação dos dois fatores, conforme o exposto na Tabela 15.

Tabela 15 – ANOVA realizada a partir dos resultados de absorção por capilaridade

Fonte da variação	F calculado	valor-P	F crítico	
Amostra (cimento)	8.9277	0.0020251	3.5546	DS
Colunas (f_{cm})	36.2060	0.0000005	3.5546	DS
Interações	5.3651	0.0050401	2.9277	DS

DS = Diferença significativa

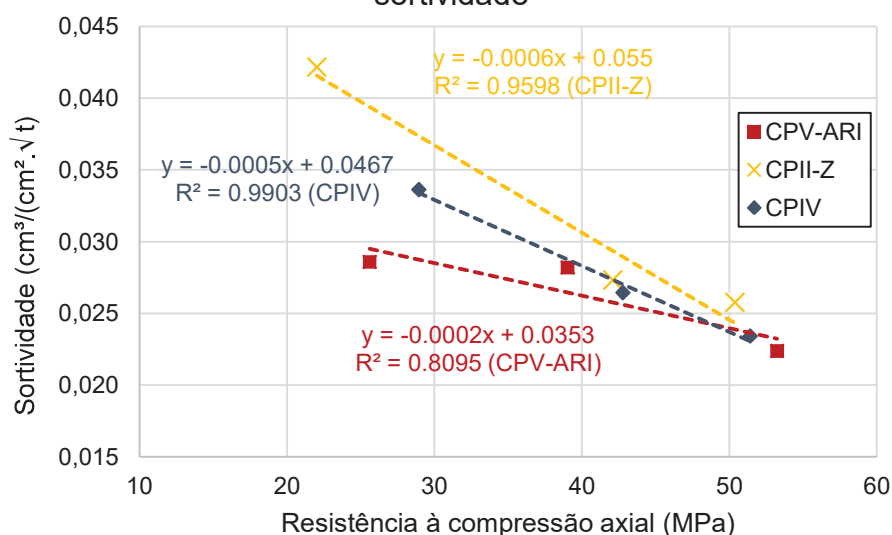
DNS = Diferença não significativa

Fonte: O autor (2018)

Ainda, a partir da comparação múltipla de médias, a sortividade das amostras foi comparada par a par, dentro de cada tipo de cimento. Amostras de concreto com CPIV apresentaram diferença significativa para qualquer classe de resistência; para o cimento CII-Z, não houve diferença significativa entre as amostras II-Z-C45 e II-Z-C35; finalmente para o cimento CPV-ARI, as amostras V-C35 e V-C25 são estatisticamente iguais.

Assim, os valores médios de resistência à compressão axial aos 91 dias foram correlacionados com as médias de sortividade (também realizada com amostras curadas por 91 dias) apresentadas, gerando a Figura 47.

Figura 47 – Correlação entre a resistência média à compressão (91 dias) e a sortividade

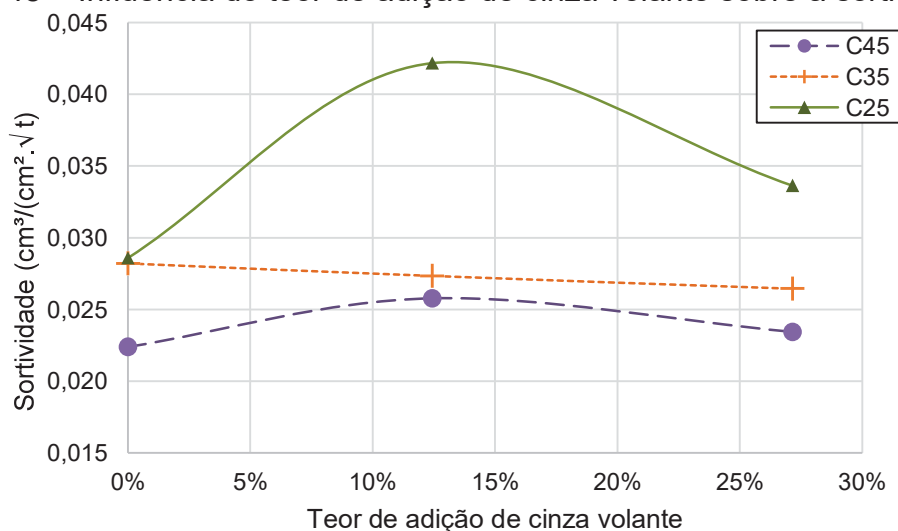


Fonte: O autor (2018)

A partir dos valores de coeficiente de determinação R^2 apresentados (0,8095 para o CPV, 0,9598 para o CII-Z e 0,9903 para o CPIV), é possível afirmar que existe uma forte relação entre as propriedades analisadas (principalmente quando as amostras possuíam maior teor de cinza volante), o que valida a análise sobre a porosidade das amostras: quanto maior a classe de resistência do concreto, menor é a relação água/aglomerante (e, portanto, menor a porosidade) e menor será a sortividade.

Kurda *et al.* (2019) e Leung *et al.* (2016) também avaliaram a sortividade de concretos variando o teor de cinza volante (de 12,9% a 60%). Os autores concluíram que a absorção de água foi inversamente proporcional ao teor da adição mineral. Nesse caso, pode-se afirmar que, a partir de um teor mínimo de cinza volante e à medida em que se aumenta a adição mineral, a absorção por capilaridade tende a diminuir. Em complemento à análise a partir da Figura 46, na Figura 48 pode-se verificar essa tendência e, possivelmente, confirmar a hipótese de Kurda *et al.* (2019), mais evidente para as amostras C25.

Figura 48 – Influência do teor de adição de cinza volante sobre a sortividade



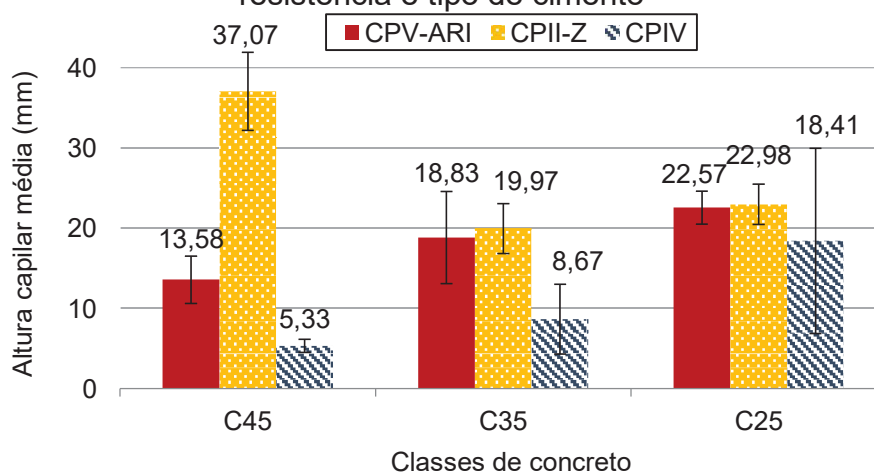
Fonte: O autor (2018)

O teor mínimo, neste estudo, foi o referente às amostras contendo 12,5% de cinza volante (CPII-Z). Uma possível justificativa para as amostras sem adição (CPV-ARI) apresentarem menores valores de sortividade pode estar relacionada à quantidade disponível de pozolana das amostras com CII-Z para formação de C-S-H extra; isto é, mesmo com um tempo adequado de cura para a hidratação deste tipo de cimento, o efeito de refinamento dos poros resultante da reação pozolânica não foi suficiente para reduzir a absorção de água pelo concreto. Cabe ressaltar, no entanto, que, a partir da análise de variância com fator único entre os valores de sortividade de concretos de mesma classe, apenas os C25 apresentaram diferença significativa entre os

diferentes tipos de cimento, enquanto que os C35 e C45 evidenciaram valores estatisticamente iguais da propriedade, independentemente do tipo de aglomerante utilizado. Esta análise reflete numa dinâmica mais complexa da reação da cinza volante no concreto frente à absorção de água por capilaridade.

Ainda, na Figura 49 é apresentada a altura capilar de água nas amostras de concreto, aferida após o ensaio de absorção.

Figura 49 – Altura capilar das amostras de concreto, em função da classe de resistência e tipo de cimento



Fonte: O autor (2018)

De acordo com a Figura 49, os concretos moldados com o maior teor de cinza volante (CPIV), apesar de não apresentarem necessariamente o menor volume de água absorvida, alcançaram as menores alturas capilares no interior do concreto, enquanto os concretos moldados com cimento CPII-Z apresentaram as maiores alturas capilares.

Sabe-se que, como também apontado por Liu *et al.* (2017c) e Hoppe Filho *et al.* (2013), a atividade pozolânica, a partir de uma cura adequada, gera C-S-H secundário que reduz a quantidade de poros capilares e sua interconectividade; e que, como afirmado por Medeiros-Junior *et al.* (2018), poros menores aumentam as tensões capilares – e, conseqüentemente, a capacidade de absorção do material. Nesse contexto, há uma sutil variação na relação entre a porosidade e a tortuosidade do concreto e a dimensão e a

interconectividade dos poros (refletidas na resistência à compressão e no teor de adição de cinza volante), na qual o efeito de densificação e o da tensão capilar podem se sobrepor, interferindo tanto na quantidade de água absorvida pelo material quanto na profundidade na qual o líquido consegue alcançar no seu interior. Isso sugere uma análise mais precisa a respeito do efeito da adição de cinza volante sobre a distribuição dos poros e sua tortuosidade.

Neste estudo, por exemplo, o consumo de cimento das amostras C25 ($265 \pm 10 \text{ kg/m}^3$) foi consideravelmente menor em relação ao das C35 e C45 ($356 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ e $490 \pm 10 \text{ kg/m}^3$, respectivamente). Para um concreto contendo cinza volante, isso resulta num menor teor de clínquer disponível para a formação de C-S-H em comparação com um concreto sem adição, podendo refletir em maior porosidade, como mencionado por Hoppe Filho *et al.* (2013). Além disso, concretos pozolânicos classe C25 também dispõem de menor quantidade de cinza volante para formação extra de C-S-H, o que diminui o efeito de refinamento de poros. Paralelamente, os concretos moldados com CPV-ARI e CPIV, a partir de uma cura adequada e mesmo consumo de cimento, apresentaram valores similares de sortividade, o que pode indicar uma estrutura de poros similar, porém com uma dinâmica de interconectividade diferente. Entretanto, para confirmar tal hipótese, um maior conhecimento da microestrutura das amostras através de um ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, por exemplo, seria necessário

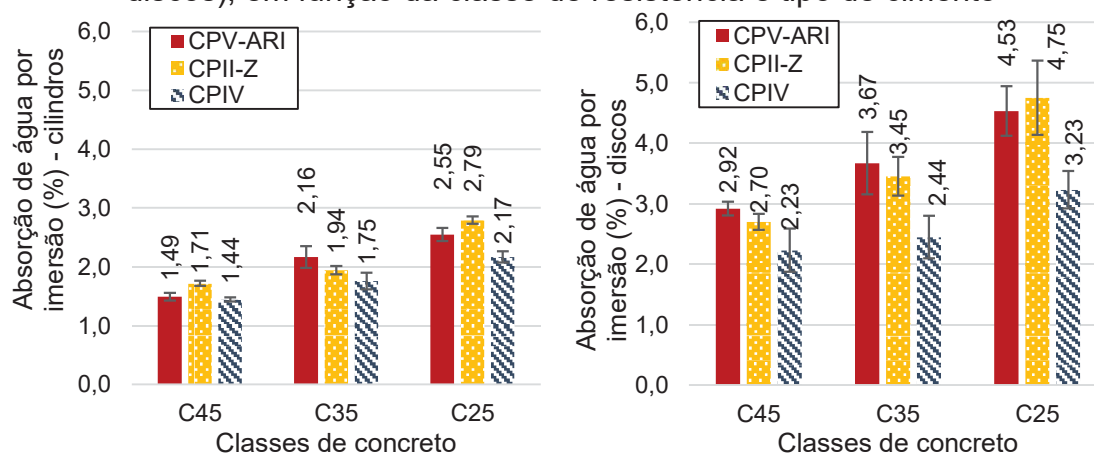
6.1.2. Absorção do concreto por imersão

A quantidade de água absorvida, em porcentagem, das amostras cilíndricas e dos discos de concreto imersos em água é apresentada na Figura 50, em função da classe de resistência do concreto e do tipo de aglomerante utilizado.

Análise de variância foi realizada para as amostras cilíndricas e para os discos, confirmando a relevância tanto do tipo de cimento quanto da classe de resistência do concreto sobre a absorção do material por imersão, independentemente da geometria do corpo de prova. Apenas a interação do

tipo de cimento com a classe do concreto dos discos não apresentou diferença significativa. O teste foi gerado com confiabilidade de 95%, sendo apresentado na Tabela 16.

Figura 50 – Absorção por imersão das amostras de concreto (cilindros e discos), em função da classe de resistência e tipo de cimento



Fonte: O autor (2018)

Tabela 16 – ANOVA realizada a partir dos resultados de absorção por imersão

	Fonte da variação	F calculado	valor-P	F crítico	
Cilindro	Amostra (cimento)	203.6235	4.36E-13	3.554557	DS
	Colunas (f_{cm})	31.92265	1.2E-06	3.554557	DS
	Interações	8.15062	0.00062	2.927744	DS
Disco	Amostra (cimento)	38.76222	3E-07	3.554557	DS
	Colunas (f_{cm})	22.3933	1.31E-05	3.554557	DS
	Interações	1.56331	0.226843	2.927744	DNS

DS = Diferença significativa

DNS = Diferença não significativa

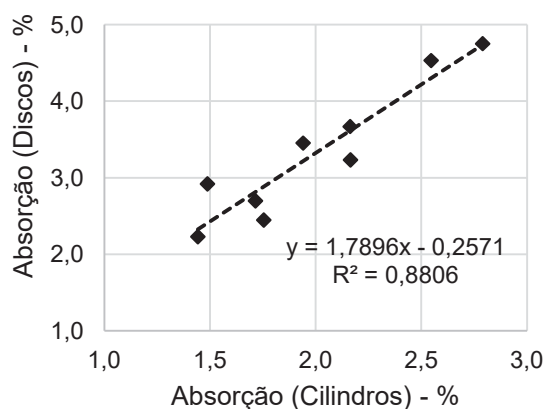
Fonte: O autor (2018)

Além disso, a partir da comparação múltipla de médias, todas as classes de resistência das amostras cilíndricas apresentaram diferença estatística (comparadas a partir do mesmo tipo de cimento); para os discos, entretanto, a análise mostrou que não houve diferença apenas entre as amostras IV-C45 e IV-C35.

Para verificar a relação da geometria das amostras com o resultado de absorção de água por imersão, na Figura 51 é possível confirmar uma tendência entre as amostras, com um coeficiente de determinação R^2 de

0,8806. Estes valores indicam uma possibilidade de utilização dos discos do topo e da base de uma amostra cilíndrica para o ensaio por imersão, conforme a ASTM C642:2013, como uma informação complementar. Dessa maneira, é uma consideração válida a realização conjunta dos ensaios de absorção por imersão e de migração acelerada do cloreto (ASTM C1202:2017), complementando os resultados e reciclando corpos de prova que seriam descartados.

Figura 51 – Correlação dos resultados de absorção por imersão de amostras de concreto cilíndricas e discos



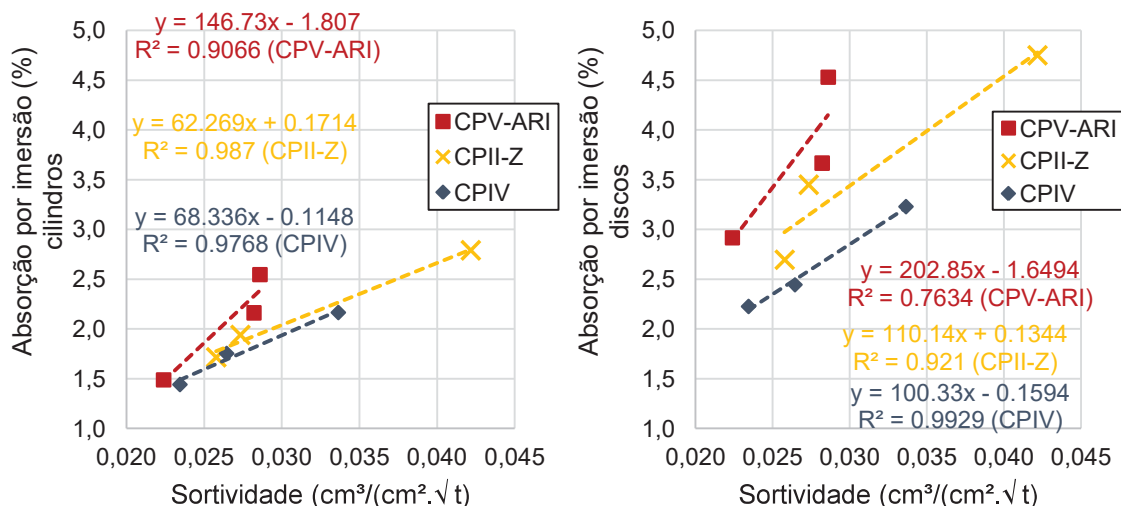
Fonte: O autor (2018)

Considerando a relação da geometria da amostra de concreto com o ensaio de absorção por imersão, ao se compararem estes resultados com os de sortividade (Figura 46), nota-se um comportamento similar entre as amostras. Além disso, uma correlação entre tais ensaios é apresentada na Figura 52, evidenciando bons coeficientes de determinação (R^2 acima de 0,900 – exceto para amostras com CPV-ARI dos discos de concreto). Tais valores sugerem um comportamento similar das amostras frente aos diferentes métodos de absorção, apresentando-se como uma validação mútua.

Ora, tal comportamento reforça a hipótese levantada no capítulo anterior, sobre o aumento do teor de cinza volante diminuir a absorção de água pelo concreto a partir de uma quantidade mínima da adição mineral na dosagem. Da Figura 50, por exemplo, todas as amostras contendo CPIV (27%

de cinza volante) absorveram menos água que as amostras contendo CPII-Z (12,5% de cinza volante). Além disso, essa comparação pode ser realizada diretamente, uma vez que tanto a absorção quanto a sortividade representam valores de massa de água absorvida pelo concreto.

Figura 52 – Correlação entre a sortividade e a absorção por imersão de cilindros e discos de concreto



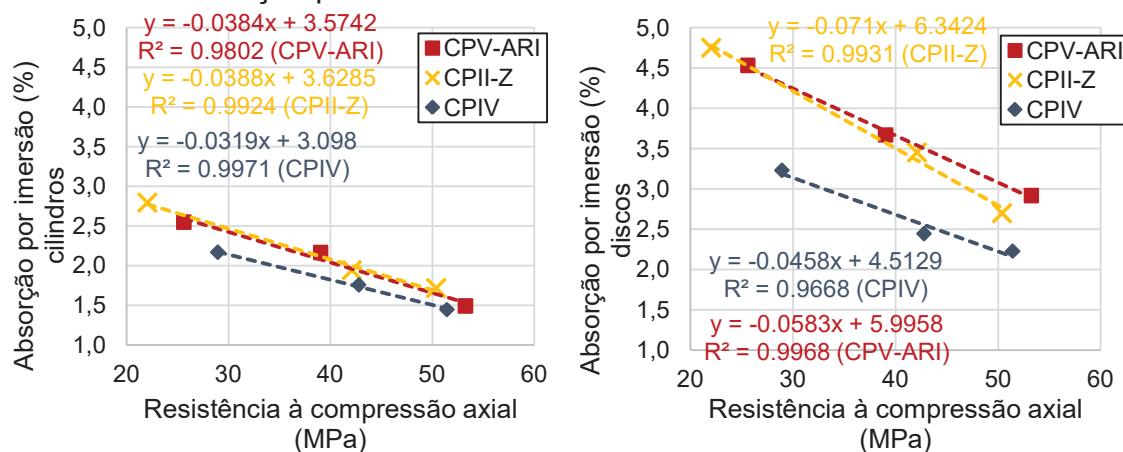
Fonte: O autor (2018)

Uma vez confirmada a relação entre a absorção por capilaridade (sortividade) e a absorção por imersão das amostras de concreto (independentemente da geometria), espera-se que a relação deste ensaio seja similar quando comparado à resistência à compressão axial (91 dias) e a variação do teor de cinza volante. Neste contexto, na Figura 53 é confirmada uma relação mais forte da absorção de água do concreto por imersão com a resistência à compressão axial (o menor R^2 foi de 0,9668), enquanto que, na Figura 54, é possível identificar o efeito do aumento da adição de cinza volante sobre a quantidade de água absorvida (destacando-se o comportamento similar dos resultados das amostras cilíndricas com o resultado de sortividade, representado na Figura 48).

Assim como neste trabalho o aumento da adição de cinza volante contribuiu para diminuir a absorção de água por imersão pelo concreto, o estudo de Hussain *et al.* (2017) indicou a mesma relação a partir do mesmo

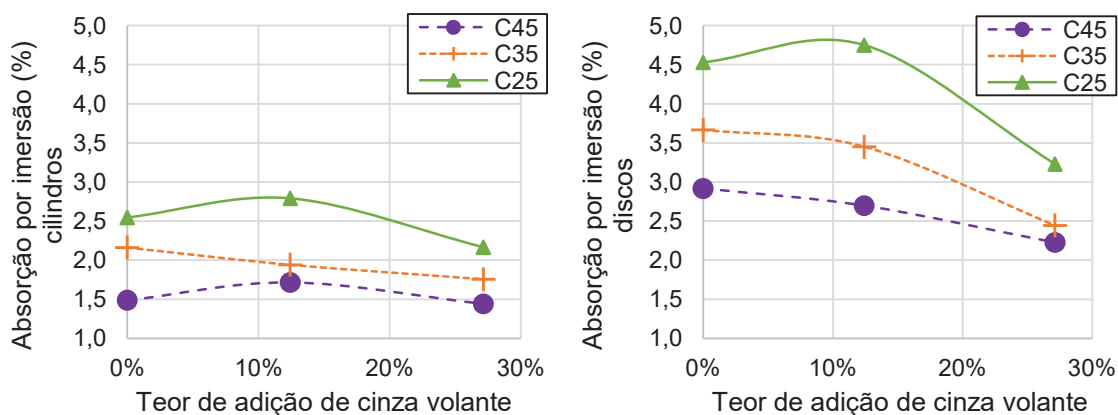
ensaio (ASTM C642). Os autores utilizaram um concreto com duas variações do teor de cinza volante (0 e 30%) e três relações água/aglomerante (0,35; 0,50 e 0,65). Mesmo com a variação da relação a/a, os concretos com cinza volante apresentaram menor absorção de água. Além da reação pozolânica, os autores atribuíram o resultado à finura da adição mineral (também apontada por Dal Molin (2011)), responsável por refinar os poros do material. Celik *et al.* (2015) também avaliaram a absorção de concretos contendo cinza volante, atribuindo à redução na porosidade o fato de concretos com a adição mineral absorverem menos água que concretos sem a adição.

Figura 53 – Correlação entre a resistência média à compressão (91 dias) e a absorção por imersão de cilindros e discos de concreto



Fonte: O autor (2018)

Figura 54 – Influência do teor de adição de cinza volante sobre a absorção por imersão de cilindros e discos de concreto



Fonte: O autor (2018)

Enquanto o ensaio de absorção por capilaridade tem relação com a ação das tensões capilares dos poros – e, portanto, a influência da dimensão destes sobre a propriedade –, a análise de absorção de água do concreto sob imersão analisa a proporção volumétrica de vazios no material – ou seja, sua porosidade. Nesse sentido, Kurda *et al.* (2019) – que, além da análise de absorção por capilaridade, também verificaram a absorção do concreto contendo cinza volante por imersão – chegaram à mesma conclusão de Hussain *et al.* (2017). A justificativa se baseia, nesse caso, na ação pozolânica da adição mineral diminuir a interconectividade da estrutura dos poros.

De fato, Kurda *et al.* (2019) associaram a porosidade do concreto à sua relação água/aglomerante, e, a partir da análise da Figura 53, é possível reafirmar a conexão da resistência à compressão axial com a absorção do material. Mesmo que os concretos moldados com cimento CPIV (27% de cinza volante) compitam com aqueles moldados com CPV-ARI (0% de cinza volante) quanto à menor absorção por imersão, a diferença entre tais amostras foi pequena quando se analisa o valor numérico do resultado. Isso retoma a ideia anterior sobre a porosidade e a conexão dos poros dos concretos estudados terem uma variação sutil quando se acrescenta à discussão a incorporação da cinza volante – uma ideia para dar suporte aos resultados de absorção por capilaridade e absorção por imersão.

Enfim, a hipótese levantada acerca da porosidade e dimensão dos poros de concretos contendo cinza volante corrobora com o exposto por Hoppe Filho *et al.* (2013) e Simčič *et al.* (2015), que afirmam que a porosidade da matriz cimentícia é controlada pela hidratação do cimento Portland, enquanto a cinza volante é responsável pela redução dos poros – e que esta está diretamente relacionada à durabilidade do concreto.

6.2. ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETO

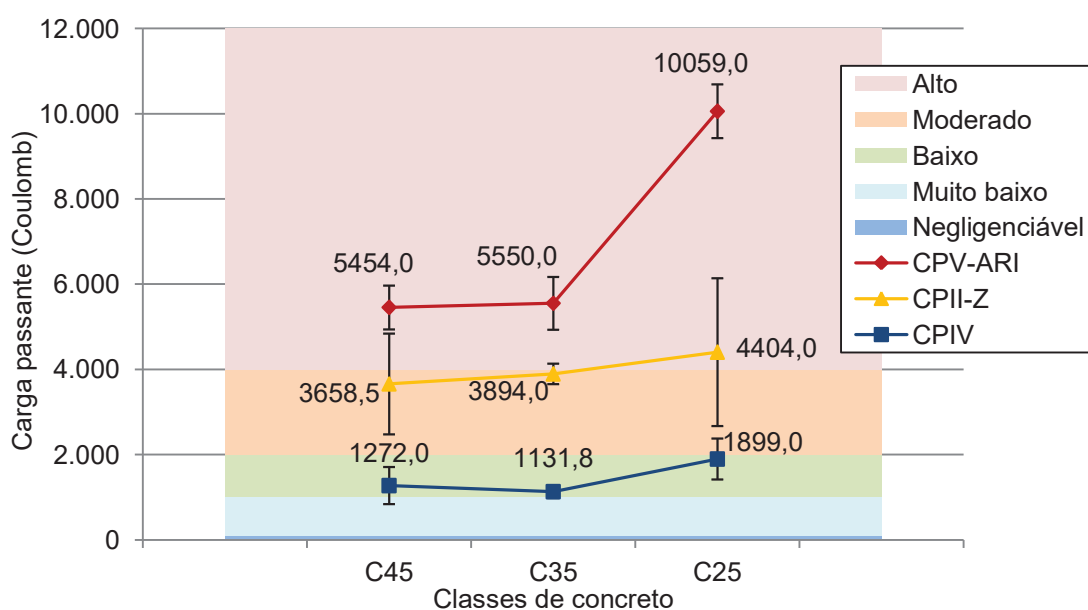
Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio das amostras de concreto (contando com uma combinação de nove

traços) de acordo com as normas ASTM C 1202:2017, NT BUILD 492:1999, AASHTO T259:1980 e NT BUILD 443:1995.

6.2.1. ASTM C1202:2017

Os resultados provenientes do ensaio de migração acelerado, conforme o método proposto pela norma ASTM C1202:2017, são representados na Figura 55, em função da carga passante (em coulomb) nas amostras de concreto. As faixas de classificação de penetrabilidade do cloreto no concreto, propostas pela referida norma, também são apresentadas.

Figura 55 – Carga passante nas amostras de concreto durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017



Fonte: O autor (2018)

Inicialmente, é possível verificar a influência benéfica da adição de cinza volante sobre a dosagem do concreto, sendo, no caso deste estudo, diretamente proporcional ao teor: concretos moldados com cimento contendo 27% da adição mineral (CPIV) apresentaram o melhor desempenho frente à penetração de cloreto – baixa penetrabilidade –, seguidos daqueles moldados

com cimento com 12,5% da adição (CPII-Z) – de moderada a alta penetrabilidade – e, por fim, de concretos sem adição de cinza volante (CPV-ARI) – alta penetrabilidade de cloreto.

A primeira hipótese levantada como justificativa aos resultados faz referência à maior capacidade de combinação do cloreto pela matriz cimentícia de concretos contendo maior teor de cinza volante, de acordo com os estudos de Cheewaket *et al.* (2010) e Yildirim *et al.* (2011). Entretanto, Jen *et al.* (2017) discutem a duração de um ensaio de penetração de cloreto no concreto como fator determinante à capacidade de combinação do íon. Dessa forma, um ensaio acelerado como o proposto pela norma ASTM C1202:2017, de seis horas de duração, não permitiria uma influência significativa nos resultados a partir da combinação do cloreto. Nesse sentido, Ioannou *et al.* (2015) e Liu *et al.* (2017b) destacaram o efeito da relação água/aglomerante (relacionado, neste estudo, às classes de resistência). Segundo os autores, o coeficiente de difusão do cloreto é diretamente afetado pela porosidade do concreto que, por sua vez, é diretamente afetada pelo seu grau de hidratação (como já explicitado por Dal Molin (2011) e Liu *et al.* (2017c)).

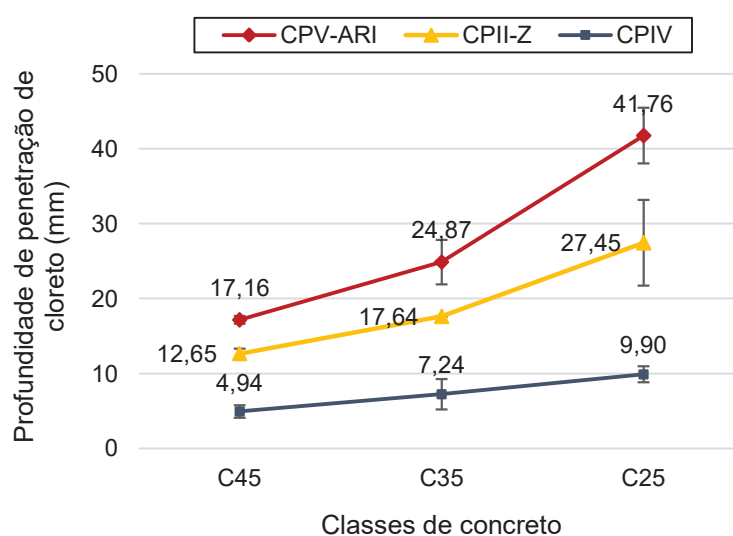
Levando em consideração o tempo de cura do concreto, no estudo de Yildirim *et al.* (2011), as amostras foram curadas durante apenas 28 dias (não sendo suficiente para a adição de cinza volante refletir nas características físicas do concreto). Portanto, uma vez que as amostras utilizadas neste estudo permaneceram em cura durante 91 dias (garantindo a hidratação da cinza volante), pode-se concluir que o efeito do refinamento dos poros proporcionado pela adição mineral teve efeito preponderante sobre os resultados apresentados na Figura 55.

Além do resultado de carga passante, foi realizada a leitura de profundidade de penetração de cloreto nas amostras ao final do ensaio, a partir da aspersão de solução de 0,1 mol/L de AgNO_3 (Figura 56).

Similar ao efeito da carga passante, a profundidade alcançada pelo cloreto no interior das amostras de concreto é inversamente proporcional ao teor de adição de cinza volante. Nesse sentido, comparando com os resultados apresentados na Figura 55, a variabilidade entre as amostras V-C25 e V-C35

não é tão saliente quando se analisa a profundidade de penetração do cloreto nestas mesmas amostras. Isso se deve ao fato de que a aspersão de nitrato de prata reage apenas com o cloreto livre no concreto; já o método de ensaio proposto pela ASTM C1202:2017 excita outros íons (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , OH^-), além do cloreto durante a aplicação de tensão, influenciando a leitura de corrente (MCGRATH e HOOTON, 1999; STANISH, *et al.*, 2001; THOMAS *et al.*, 2018).

Figura 56 – Profundidade de penetração de cloreto, segundo precipitação de cloreto de prata nas amostras recém ensaiadas



Fonte: O autor (2018)

Para verificar se houve diferença estatística entre os resultados das amostras de diferentes cimentos e classes de concreto, foram realizados análise de variância e comparação múltipla de médias. Para um nível de significância de 95%, a análise de variância indicou diferença significativa entre as amostras – tanto para comparação de carga passante quanto da profundidade de penetração, conforme indicado na Tabela 17.

Considerando a classe de resistência, a maior diferença dentro de cada tipo de cimento ocorreu entre as amostras C25 e C35. Para a resistência à penetração de cloreto segundo o ensaio de migração acelerado, os concretos C45 não apresentaram diferença significativa quando comparados aos C35, para qualquer tipo de cimento. Quando comparados os concretos C35 e C25,

houve diferença significativa para os concretos moldados com CPV-ARI e CPIV. Tal informação foi confirmada a partir da realização de análise de comparação múltipla de médias (Figura 57), onde a barra horizontal representa igualdade estatística das amostras.

Tabela 17 – ANOVA realizada a partir dos resultados da norma ASTM C1202:2017

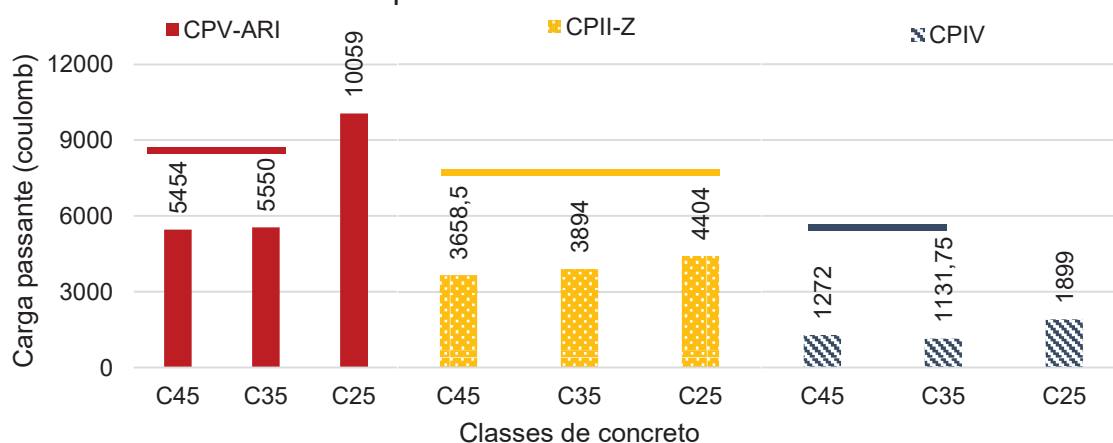
	Fonte da variação	F calculado	valor-P	F crítico	
Carga passante	Amostra (cimento)	23.61783	9.27E-06	3.554557	DS
	Colunas (f_{cm})	122.3974	3.32E-11	3.554557	DS
	Interações	8.301162	0.00056	2.927744	DS
Profundidade de penetração	Amostra (cimento)	70.1315	3.18E-09	3.554557	DS
	Colunas (f_{cm})	130.4509	1.94E-11	3.554557	DS
	Interações	10.21998	0.000169	2.927744	DS

DS = Diferença significativa

DNS = Diferença não significativa

Fonte: O autor (2018)

Figura 57 – Comparação múltipla de médias dos resultados provenientes do ensaio pela norma ASTM C1202:2017

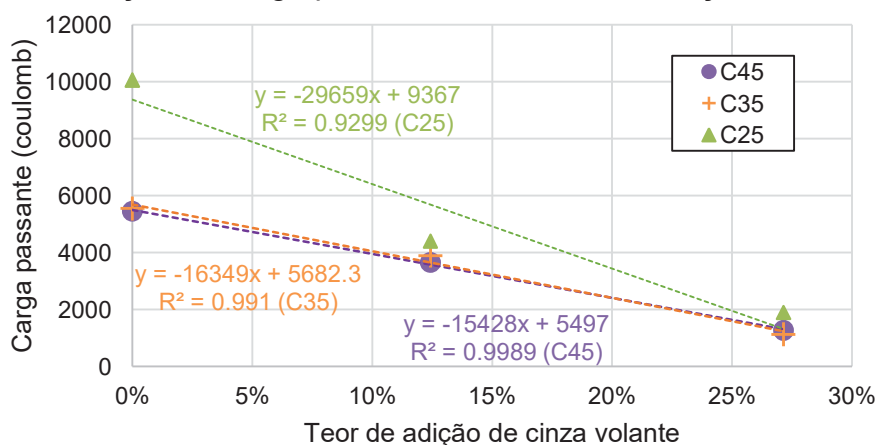


Fonte: O autor (2018)

Mesmo que os resultados das amostras de concreto moldadas com cimento CPII-Z oscilem nas faixas de classificação de resistência à penetração de cloreto propostas pela ASTM C1202:2017, pode-se dizer, a partir das análises estatísticas, que cada tipo de cimento se apresentou majoritariamente

dentro de uma categoria de penetrabilidade: alta para CPV-ARI, moderada para CII-Z e baixa para CIII. Nesse sentido – e de modo a tornar evidente o efeito da cinza volante –, na Figura 58 é apresentada a relação do efeito da adição mineral com a carga passante durante o ensaio de migração do cloreto.

Figura 58 – Relação da carga passante com o teor de adição de cinza volante



Fonte: O autor (2018)

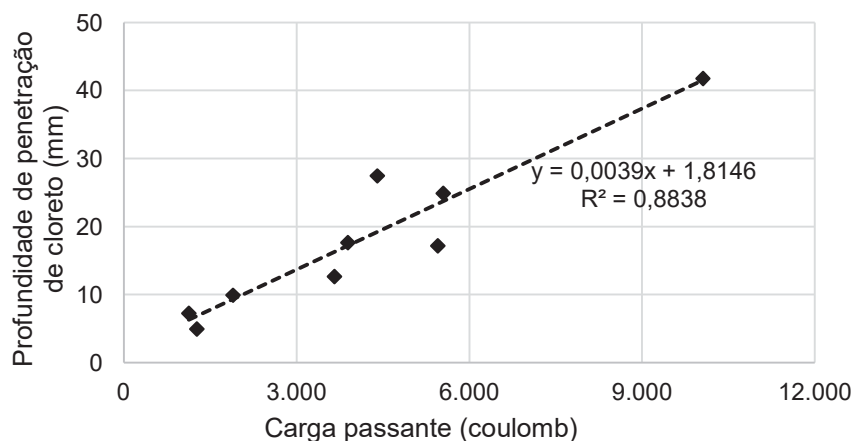
Neste caso, o uso de adição mineral se justifica no que compete à penetração de cloreto no concreto, conforme também exposto por Hoppe Filho *et al.* (2013) e complementando a ideia apresentada por Ioannou *et al.* (2015) e Liu *et al.* (2017b).

De modo a verificar a precisão entre a profundidade de penetração do cloreto no concreto e a resistência do material a partir da carga passante, na Figura 59, é possível visualizar a correlação entre os dois resultados, que apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,8838. Sendo um valor de boa correlação, tais resultados se apresentam como um complemento aos valores de leitura de carga passante propostos pela norma.

Com a equação de correlação dos dados obtidos do ensaio realizado com base na ASTM C1202:2017, foi possível elaborar uma nova faixa de classificação do concreto em relação à penetrabilidade do cloreto, considerando, além da carga passante, a profundidade no concreto onde foi encontrado o cloreto livre (numa concentração de, pelo menos, 0,15% sobre a

massa de cimento, conforme Otsuki *et al.* (1992)). Tal classificação é resumida na Tabela 18.

Figura 59 – Correlação entre a profundidade de penetração do cloreto no concreto e a carga passante



Fonte: O autor (2018)

Tabela 18 – Classificação do concreto de acordo com a profundidade de penetração de cloreto

Carga passante (Coulomb)	Penetrabilidade do íon cloreto	Profundidade de penetração de cloreto (mm)
> 4000	Alta	> 17,41
2000 - 4000	Moderada	9,61 – 17,41
1000 - 2000	Baixa	5,71 – 9,61
100 - 1000	Muito baixa	2,20 – 5,71
< 100	Negligenciável	< 2,20

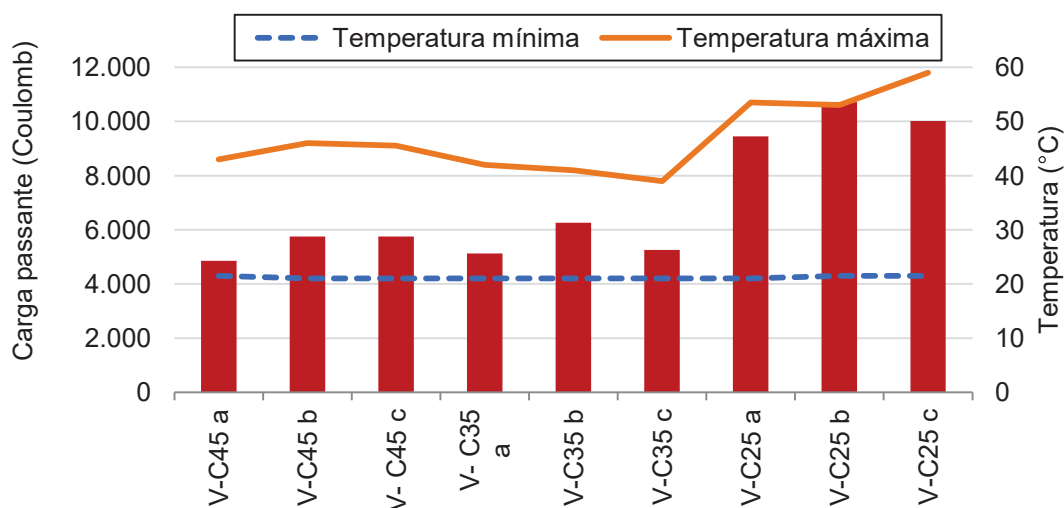
Fonte: O autor (2018)

Por fim, durante as leituras de corrente de cada amostra, foi, também, aferida a variação da temperatura. Os valores máximos e mínimos de temperatura alcançados em cada célula de ensaio são representados, em função do tipo de cimento utilizado, na Figura 60, na Figura 61 e na Figura 62 – respectivamente CPV-ARI, CPII-Z e CPIV.

Nessa situação, dando enfoque à temperatura máxima, é possível visualizar sua relação direta com a carga passante em cada amostra, independentemente do tipo de aglomerante utilizado (as maiores cargas foram

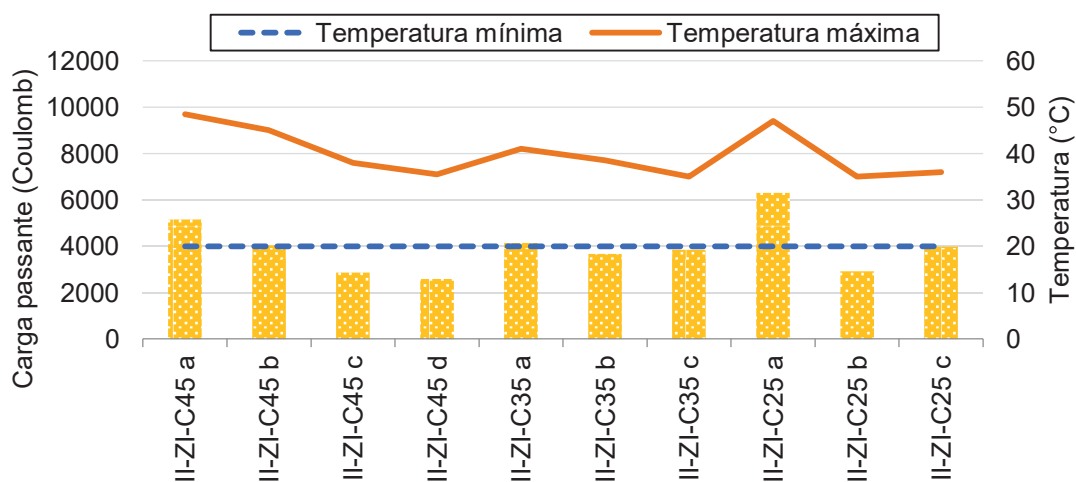
registradas quando a temperatura atingiu seu valor máximo durante o ensaio). Estes dados convergem à atenção dada pelos estudos de Stanish *et al.* (2001), Julio-Betancourt e Hooton (2004) e Thomas *et al.*, 2018. O aumento da cinética de movimentação dos íons nos concretos de classes de resistência menores (menor relação a/c) contribuiu ao aumento da temperatura, confirmando a relação com os resultados apresentados. Isso se deve, principalmente, ao fato de que as polaridades opostas nas soluções favorecem a condutividade dos íons, refletindo no aumento da temperatura na solução.

Figura 60 – Limites de temperatura alcançados para amostras de concreto com cimento CPV-ARI durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017



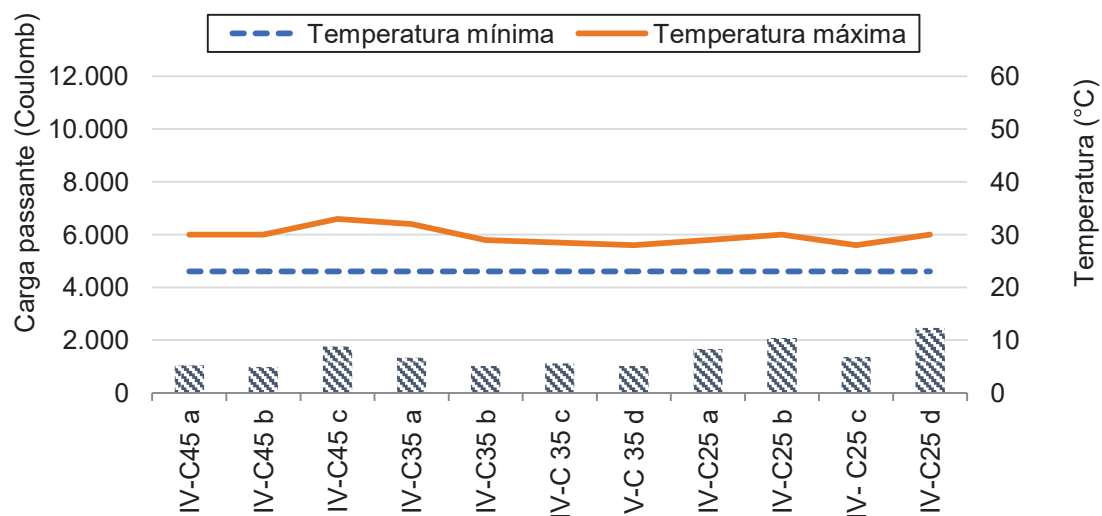
Fonte: O autor (2018)

Figura 61 – Limites de temperatura alcançados para amostras de concreto com cimento CPII-Z durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017



Fonte: O autor (2018)

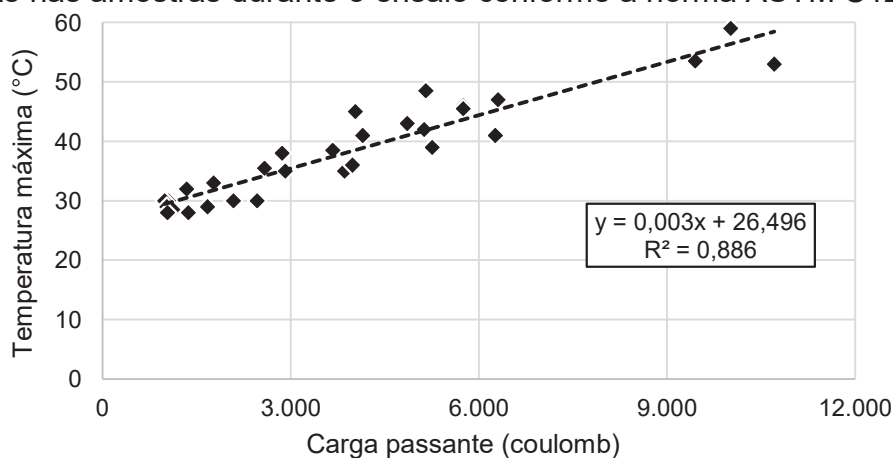
Figura 62 – Limites de temperatura alcançados para amostras de concreto com cimento CPIV durante o ensaio proposto pela norma ASTM C1202:2017



Fonte: O autor (2018)

Na Figura 63, é apresentada a correlação da temperatura máxima com a carga passante para todas as combinações de traço de concreto, obtendo-se um coeficiente de determinação relativamente forte, de 0,886. Isso sugere que o monitoramento da temperatura durante o ensaio é um parâmetro que pode ser considerado como ferramenta de análise, possibilitando, por exemplo, a elaboração de ábacos de temperatura para comparação com as faixas de classificação propostas pela ASTM C1202:2017

Figura 63 – Correlação entre a temperatura máxima alcançada com a carga passante nas amostras durante o ensaio conforme a norma ASTM C1202:2017



Fonte: O autor (2018)

6.2.2. NT BUILD 492:1999

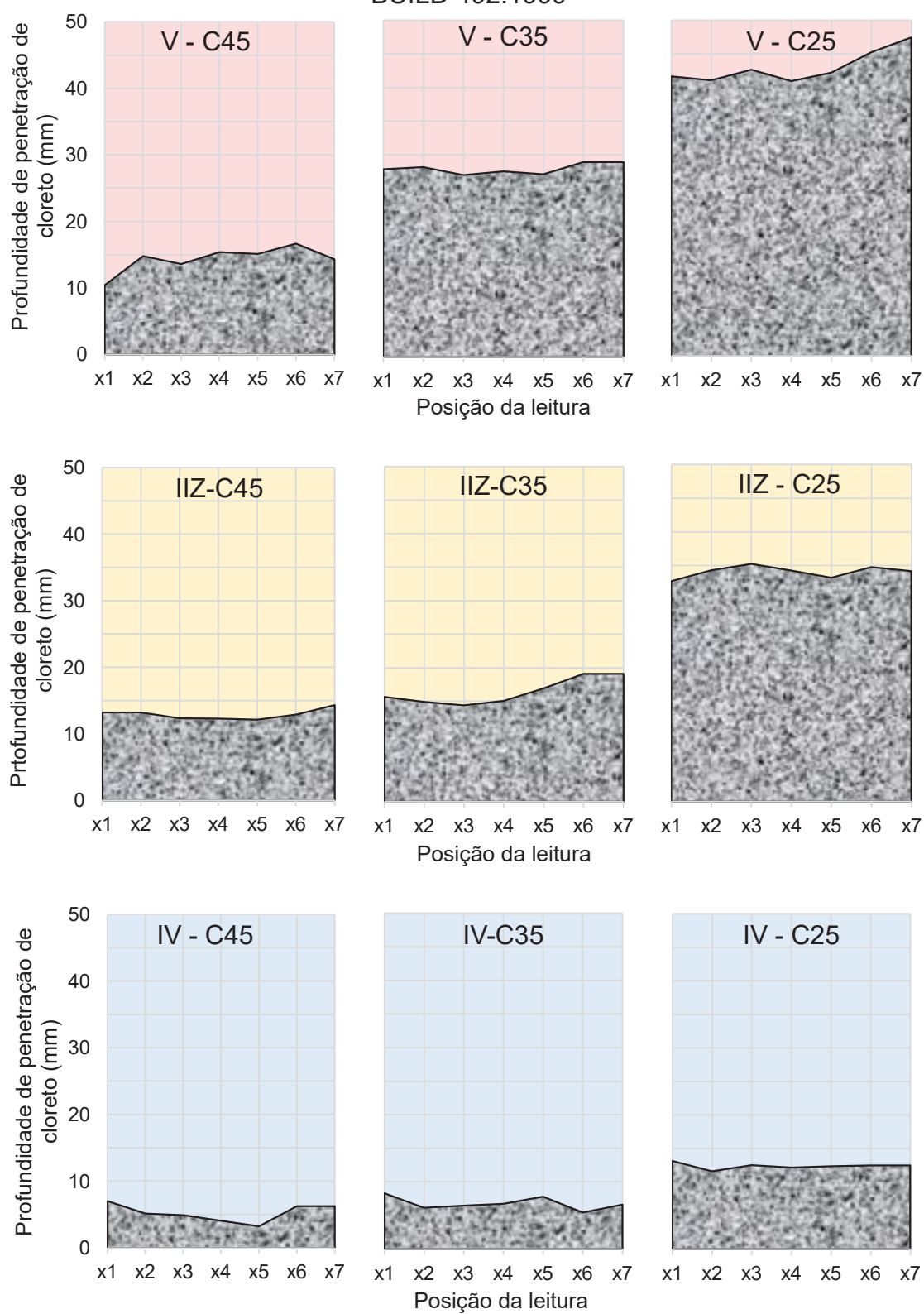
Os resultados de coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário (D_{ns}) foram calculados a partir da leitura de penetração do íon (aspersão de 0,1 mol/L de $AgNO_3$), utilizadas como parâmetro de entrada na Equação 10. A fim de evidenciar o comportamento da frente de penetração do cloreto nas amostras de concreto foi gerada a Figura 64, onde é visível a diminuição do alcance do íon com o aumento do teor de cinza volante (representado pelo tipo dos cimentos).

Na Figura 65 são apresentados os valores de coeficiente de difusão, em função do tipo de cimento e da classe de resistência do concreto. Análise de variância foi realizada para confirmar a diferença estatística entre os valores obtidos. O resultado do teste é apresentado na Tabela 19, com confiabilidade de 95%. A verificação mostrou que todas as amostras apresentaram valores de coeficiente de difusão distintos, conforme as variações de resistência e teor de cinza volante.

Além da ANOVA realizada com fator duplo, foi realizada a comparação múltipla de médias para todas as amostras de concreto. Todos os resultados apresentaram diferença estatística para os valores de coeficiente de difusão do cloreto, confirmando a influência da cinza volante sobre o parâmetro, inclusive para a variação do traço de concretos contendo 27% de cinza volante (CPIV), que apresentaram os menores D_{ns} .

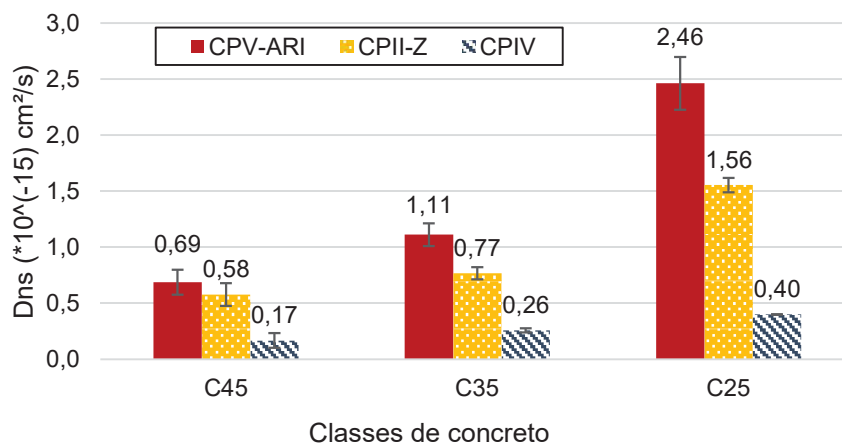
Celik *et al.* (2015) também avaliaram a resistência do concreto com e sem adição de cinza volante à penetração do cloreto pelo método proposto pela norma NT BUILD 492:1999. Os autores atribuíram os menores valores de D_{ns} dos concretos moldados com a adição mineral à redução dos vazios e dos poros provocados pela ação pozolânica. Segundo a referência de Gjrv (2009), citada pelos autores, a resistência de concretos com 30% e 50% de substituição do cimento por cinza volante foi extremamente alta em relação à penetração de cloreto. Tal referência é exposta na Tabela 20.

Figura 64 – Profundidade de penetração de cloreto conforme aspersão de AgNO_3 sobre as amostras de concreto recém ensaiadas conforme a norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

Figura 65 – Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário



Fonte: O autor (2018)

Tabela 19 – ANOVA realizada para os resultados de coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário (NT BUILD 492:1999)

Fonte da variação	F calculado	valor-P	F crítico	
Amostra (cimento)	218.4412606	2.37881E-13	3.554557	DS
Colunas (f_{cm})	268.8408214	3.92661E-14	3.554557	DS
Interações	44.44734022	4.3037E-09	2.927744	DS

DS = Diferença significativa

DNS = Diferença não significativa

Fonte: O autor (2018)

Tabela 20 – Resistência do concreto à penetração de cloreto em função do coeficiente de difusão no estado não estacionário

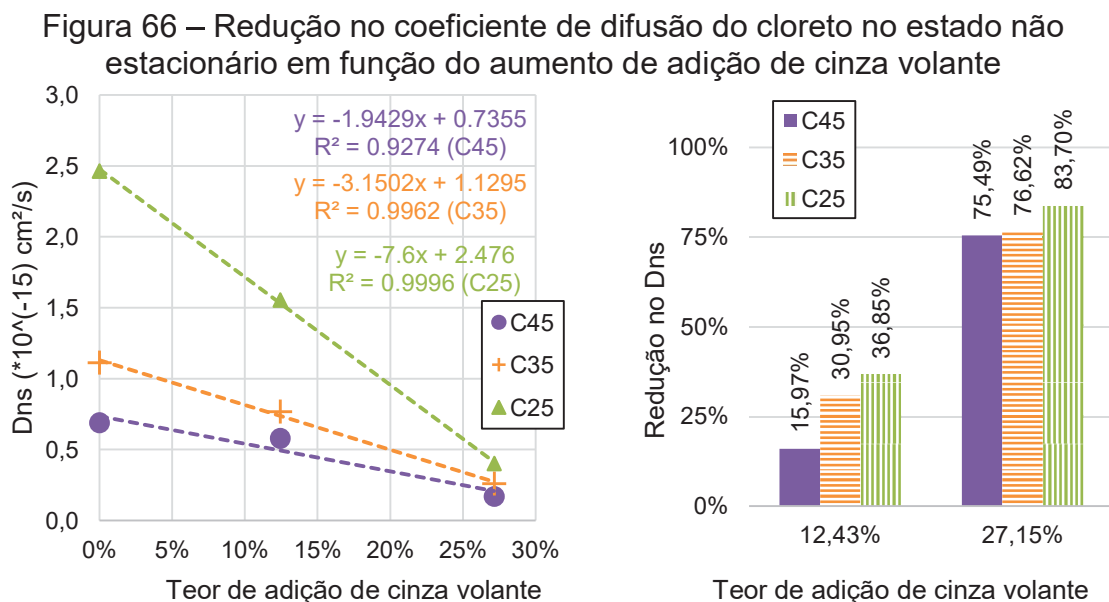
Resistência do concreto à penetração de cloreto	D_{ns} (10^{-12} m ² /s)
Baixa	> 15
Moderada	10 – 15
Alta	5 – 10
Muito alta	2,5 – 5
Extremamente alta	< 2,5

Fonte: Adaptado de Gjrv (2009) *apud* Celik *et al.* (2015)

De acordo com Celik *et al.* (2015), quanto maior o teor de adição de cinza volante, maior a resistência do concreto  penetração de cloreto. Simi *et al.* (2015) também encontraram valores menores de coeficiente de difusão no estado não estacionário conforme se aumentou o teor de cinza volante de 0 para 20% e de 20 para 50%, quando comparados com concretos sem adição. Dependendo da origem da pozolana, a redução no D_{ns} foi de mais de 80%.

Silva *et al.* (2018) também apresentaram valores baixos de D_{ns} quando o concreto foi moldado com 25 e 50% de cinza volante na dosagem (quando comparados com um concreto sem adição, a redução foi bastante significativa para os dois valores de adição). Entretanto, quando os concretos com adição pozolânica foram comparados entre si, não apresentaram uma variação tão efetiva quanto o que apresentaram os estudos anteriormente citados. Isso pode ser justificado pela origem da cinza volante, cujo teor de óxidos (SiO_2 e CaO) pode ter gerado menos influência sobre o coeficiente de difusão. Aponte *et al.* (2012) também obtiveram diferentes valores de D_{ns} conforme se alterou a origem da cinza volante. Além disso, a tendência de estabilização do valor de D_{ns} apresentado por Silva *et al.* (2018) sugere a existência de um teor ótimo da adição na qual o coeficiente de difusão é mínimo.

Em paralelo ao exposto por Silva *et al.* (2018), as amostras deste estudo evidenciaram uma redução elevada no coeficiente de difusão do cloreto conforme houve aumento no teor de cinza volante, sendo que a taxa de diminuição do parâmetro foi maior para os concretos classe C25. Estas informações são evidenciadas na Figura 66.



Fonte: O autor (2018)

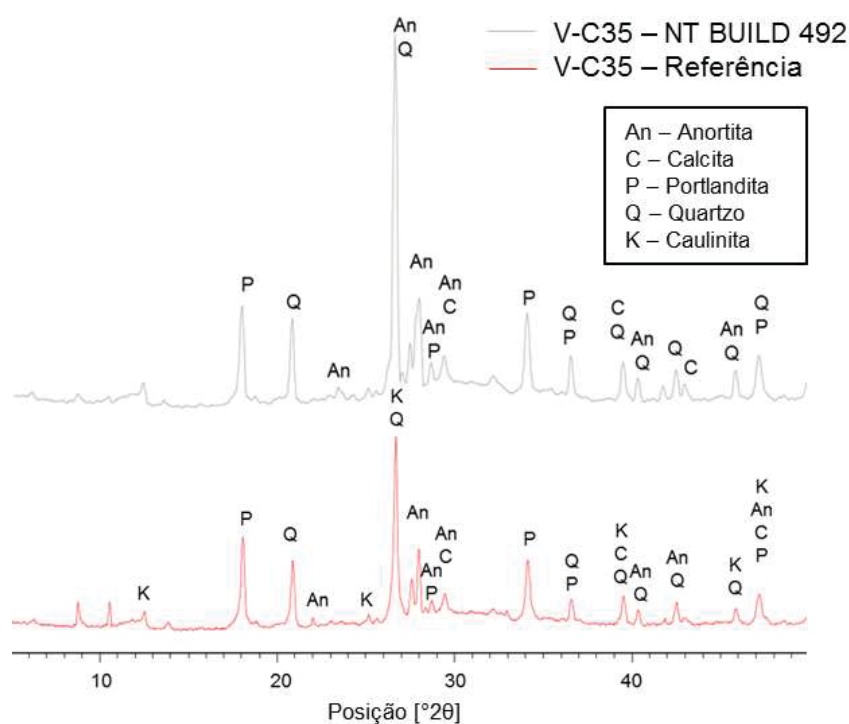
Além da taxa de redução apresentada, é possível notar que os concretos contendo 27% de adição (referentes à utilização do cimento CPIV) apresentaram coeficientes de difusão com valores próximos (mesmo sendo estatisticamente diferentes). Novamente é possível verificar a capacidade de influência da adição mineral sobre a durabilidade do concreto, refletida a partir da diminuição da difusividade do cloreto e da porosidade (HOPPE FILHO *et al.*, 2013; GJØRV, 2015). No estudo de Aponte *et al.* (2012), a variação no teor de cinza volante (de 25 e 43%) não gerou grandes alterações no D_{ns} do concreto. Essa proximidade de valores de D_{ns} para maiores teores de cinza volante também foram apresentados por Silva *et al.* (2018), e, apesar de os traços dos estudos citados serem diferentes dos utilizados no programa experimental deste trabalho, pode-se inferir que o teor ótimo de cinza volante na qual a redução do D_{ns} do cloreto é máxima encontra-se entre 27% e 43%.

A relação água/aglomerante, representada a partir da variação das classes de concreto, foi outro fator de relevância a respeito dos resultados de coeficiente de difusão do cloreto no concreto. De acordo com Aponte *et al.* (2012), a diminuição da porosidade devido à redução do teor de água na dosagem do concreto auxilia na diminuição da difusividade do íon.

Atrelada à hipótese de o tempo de exposição do concreto ao cloreto ser baixo para formação de sais de Friedel, mencionada por Jen *et al.* (2017) e discutida no item 6.2.1 deste trabalho, os resultados provenientes do ensaio segundo a norma NT BUILD 492:1999 apresentaram-se, também, mais em função do efeito físico da adição de cinza volante do que do seu efeito químico. Apesar de o tempo de exposição ao íon pelo método nórdico ser um pouco maior (24 horas) que o tempo proposto no método americano, não há, ainda, garantia da formação de cloroaluminatos na matriz cimentícia dos concretos.

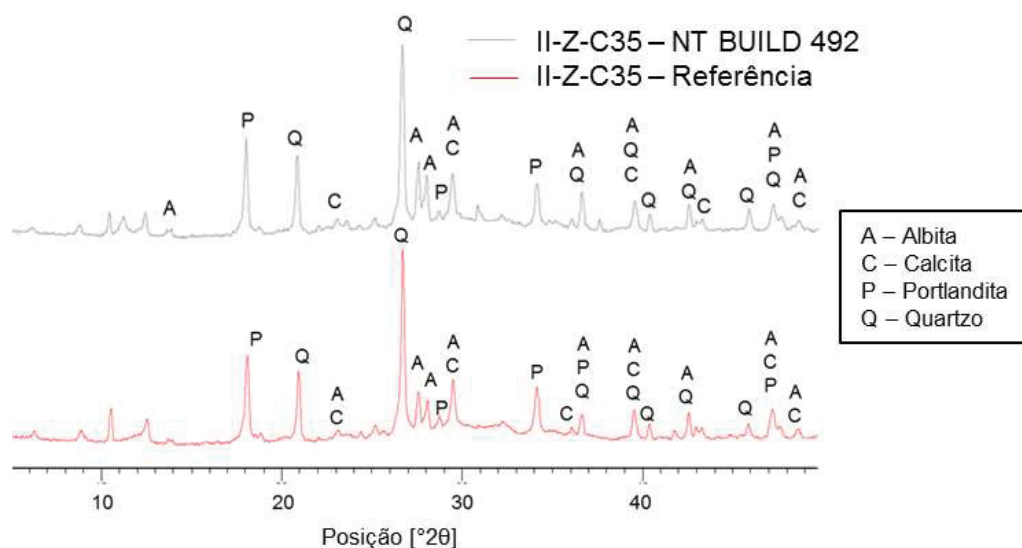
Nesse sentido, através da análise dos resultados de difração de raios-X realizado nas amostras C35 para os três tipos de cimento, foi possível comparar os difratogramas das amostras de referência (sem exposição ao cloreto) e após o ensaio segundo a NT BUILD 492:1999 (com exposição a uma solução de 11,1% de NaCl). As análises são apresentadas na Figura 67, na Figura 68 e na Figura 69.

Figura 67 – Difratoograma da amostra V-C35 de referência e após o ensaio conforme a NT BUILD 492:1999



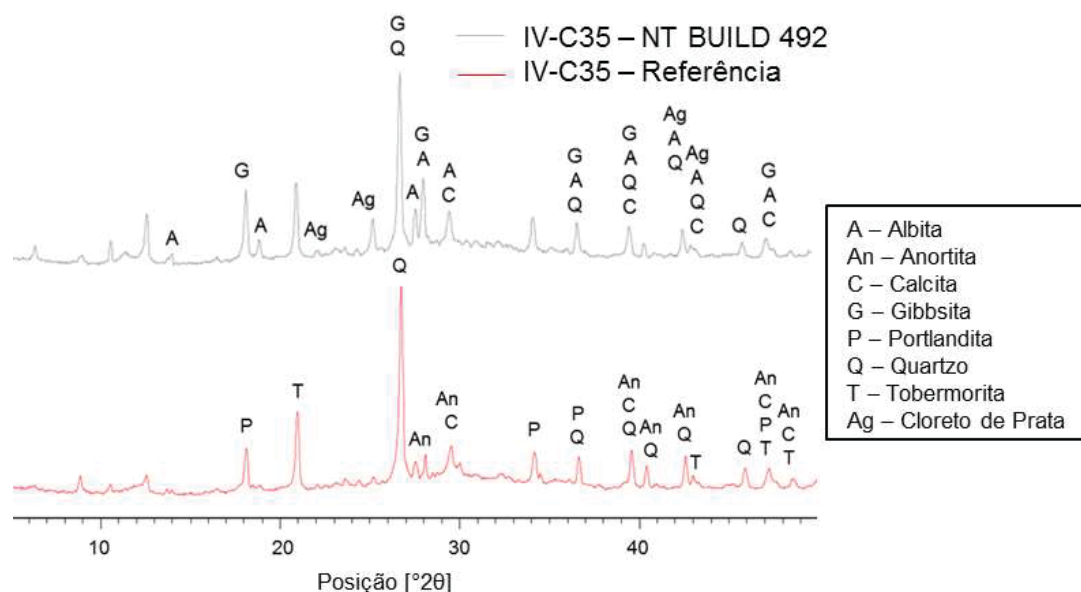
Fonte: O autor (2018)

Figura 68 – Difratoograma da amostra II-Z-C35 de referência e após o ensaio conforme a NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

Figura 69 – Difratoograma da amostra IV-C35 de referência e após o ensaio conforme a NT BUILD 492:1999

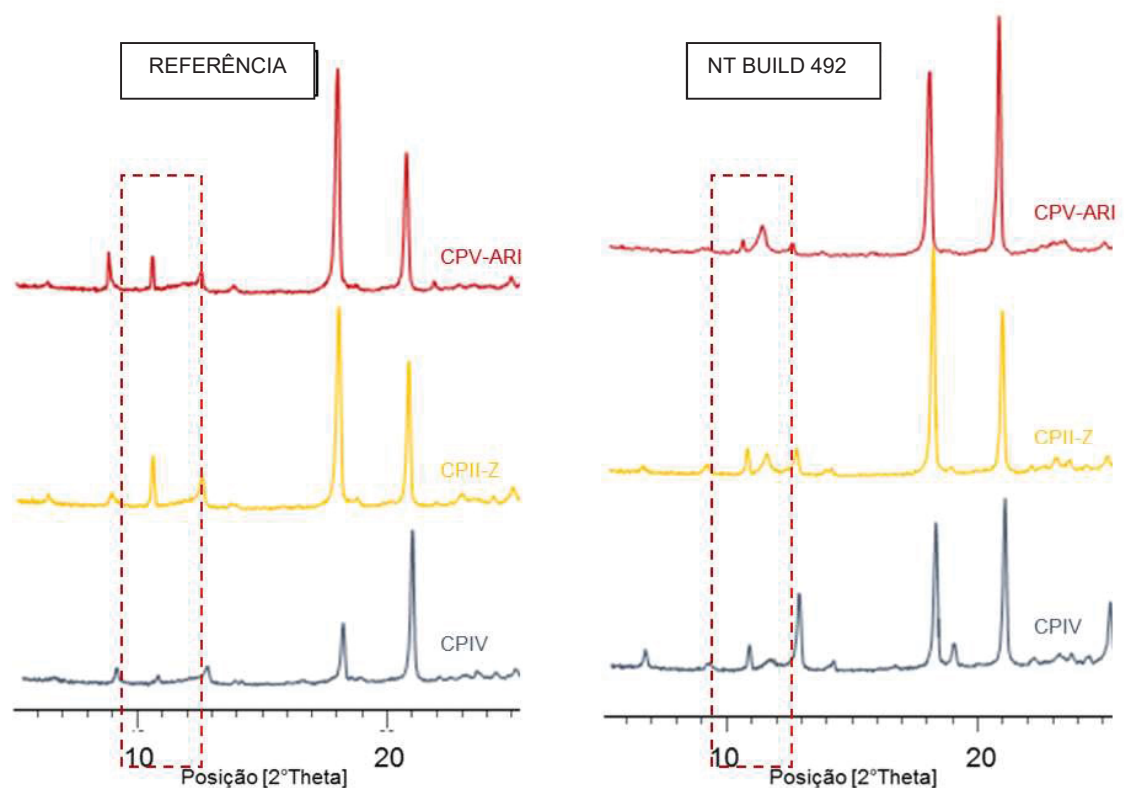


Fonte: O autor (2018)

A partir da utilização do software X'Pert HighScore para interpretação dos picos e comparação dos elementos a partir do banco de dados do ICDD, não foi detectada a presença de cloroaluminatos ou cloro-sulfoaluminatos nas amostras. No entanto, tomando-se por base alguns estudos (KOPECSKÓ, 2006; JO *et al.*, 2012; ROJAS *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2018), é possível identificar a angulação do sal de Friedel e do sal de Kuzel para uma referência $^{\circ}2\theta$ como sendo próximo a 11° . A partir desta informação, na Figura 70 (difratogramas das amostras de referência e após a exposição ao cloreto), nota-se a variação do pico que possivelmente seria referente ao cloroaluminatos (uma vez que se torna mais pronunciado para as amostras que continham cinza volante).

Apesar de tais considerações, quando as amostras de referência (não expostas ao cloreto) também foram confrontadas entre si, o pico próximo à posição $11^{\circ}2\theta$ também estava presente (Figura 70), o que invalida a hipótese e descarta a confirmação da presença de sal de Friedel ou Kuzel pelo método da difração de raios-X.

Figura 70 – Comparação dos difratogramas das amostras C35 de referência e expostas ao cloreto



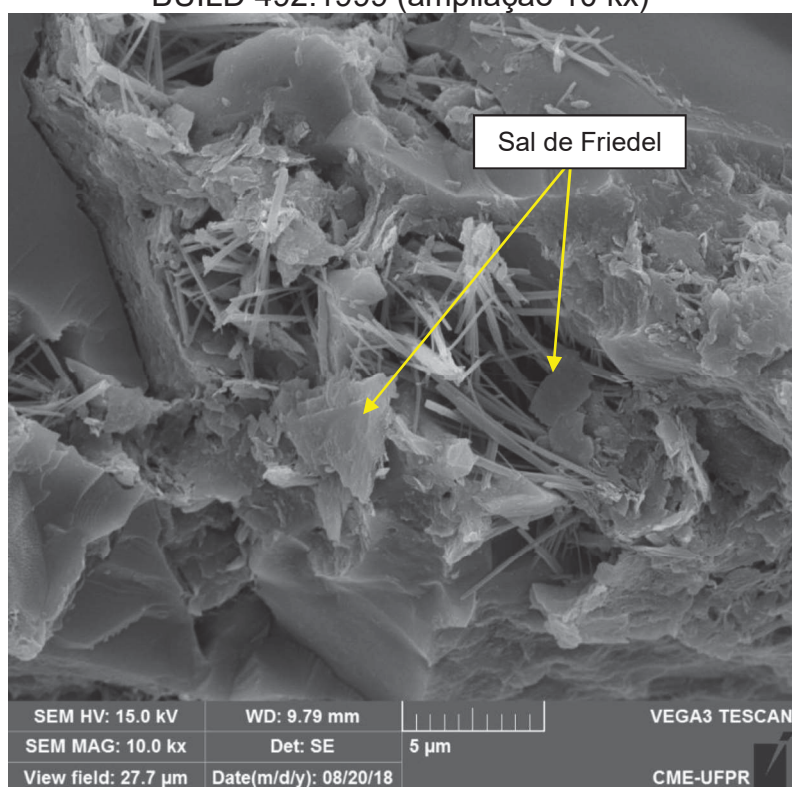
Fonte: O autor (2018)

Embora não tenha sido possível comprovar a formação ou não de cloroaluminatos pela análise dos difratogramas, as imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), por outro lado, apresentam estruturas morfolologicamente similares aos sais de Friedel. É possível visualizar tais estruturas nas imagens referentes às amostras contendo cinza volante (II-Z-C35 e IV-C35) na Figura 71 e na Figura 73, respectivamente.

Nos estudos de Zhang *et al.* (2011), Jo *et al.* (2012), Rojas *et al.* (2014), Ma *et al.* (2015) e Ma *et al.* (2018) foi identificado o cloroaluminato como um padrão de elemento hexagonal com dimensão em torno de 1 a 5 μm , pouco definido (diferente do hidróxido de cálcio) e sobreposto, como um sistema de escamas. Ainda, os trabalhos de Ma *et al.* (2009) e Zhang *et al.* (2015), representados na Figura 72, foram utilizados como parâmetro de comparação para identificação do sal de Friedel exposto na Figura 71. Este

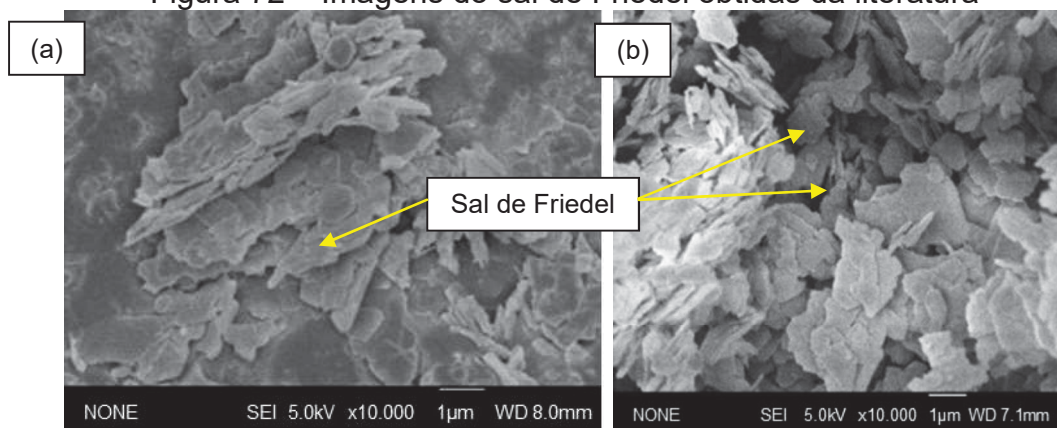
mesmo padrão é visível nas amostras contendo cinza volante (CPII-Z e CPIV), o que sugere que o tempo de exposição do concreto ao cloreto proposto pelo método nórdico permite a formação do sal de Friedel na matriz cimentícia.

Figura 71 – MEV de amostra II-Z-C35, após ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999 (ampliação 10 kx)



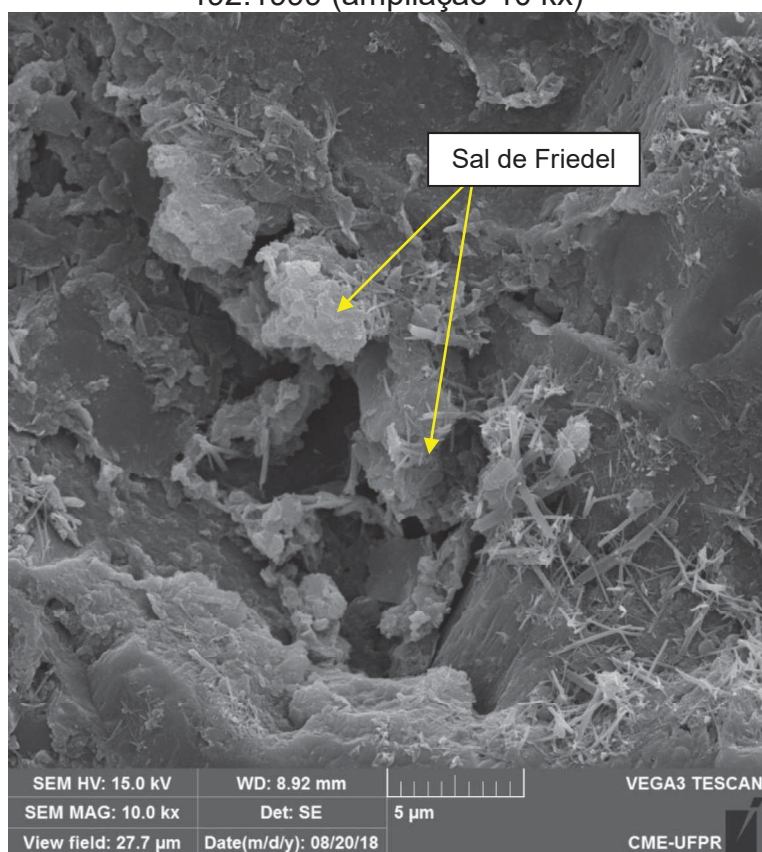
Fonte: O autor (2018)

Figura 72 – Imagens do sal de Friedel obtidas da literatura



Fonte: (a) MA *et al.* (2009) e (b) Zhang *et al.* (2015)

Figura 73 – MEV de amostra IV-C35, após ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999 (ampliação 10 kx)



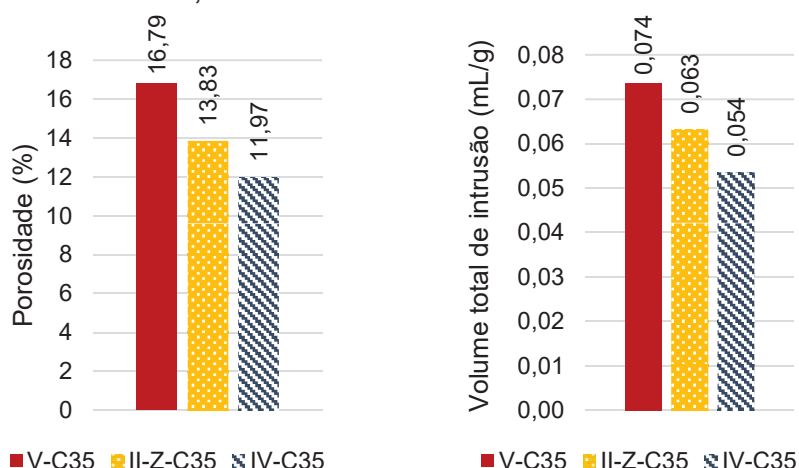
Fonte: O autor (2018)

Embora houvesse enfoque nas imagens do cloroaluminato, nenhum dos estudos citados apresentou uma morfologia precisa para o cloro-sulfoaluminato (sal de Kuzel). É possível que o sal de Kuzel seja mais visível em amostras expostas ao ataque por sulfatos, o que pode justificar a falta de evidência nas amostras de MEV deste estudo. Além disso, segundo Geng *et al.* (2015) o cloro-sulfoaluminato é formado a partir da decomposição parcial do sal de Friedel, onde parte do cloreto (Cl^-) é substituído pelo sulfato (SO_4^{2-}) e parte permanece combinada ao sal. Isso também é visível da Equação 5 e Equação 6.

Ora apesar da ausência de precisão dos difratogramas referentes às análises expostas ao cloreto em determinar a presença de cloroaluminato e cloro-sulfoaluminato, as imagens de MEV sugerem a formação do sal e, portanto, a influência da cinza volante quimicamente sobre a resistência do concreto à penetração de cloreto através dos resultados de coeficiente de

difusão do íon no estado não estacionário. Porém, a análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) dessas amostras também deixa evidente que a menor porosidade das amostras foi referente àquelas que continham maior teor de cinza volante, confirmando influência do efeito físico. As informações são apresentadas na Figura 74.

Figura 74 – Porosidade e volume total de intrusão de mercúrio das amostras C35, de acordo com o ensaio de PIM



Fonte: O autor (2018)

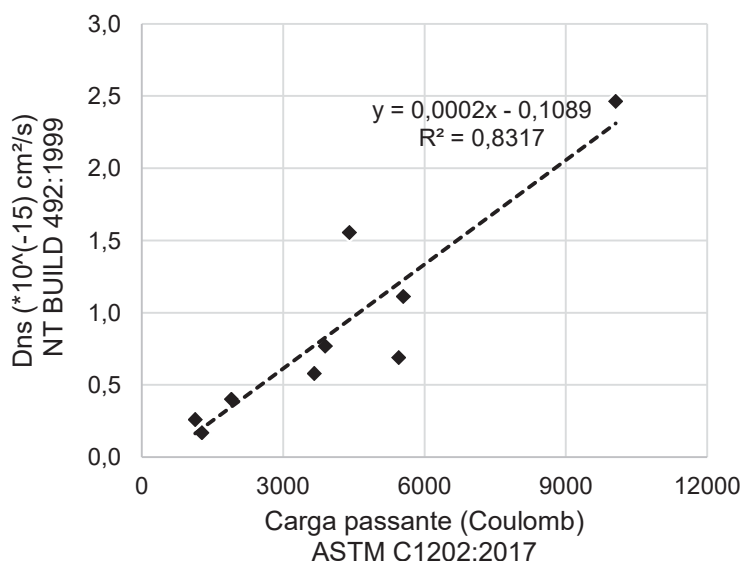
O valor de porosidade e do volume total de intrusão de mercúrio nas amostras diminuiu entre 14% e 17% para as amostras contendo 12,5% de cinza volante, e entre 27% e 28% para as amostras contendo 27% da adição.

Em outra análise, para verificar a compatibilidade entre as normas ASTM C1202:2017 e NT BUILD 492:1999, na Figura 75, é apresentada uma correlação entre os resultados de coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário e o total de carga passante nas amostras de concreto. Os dados são apresentados em função das médias dos resultados obtidos pelas duas normas, representando os nove traços utilizados neste estudo (variação de tipo de cimento e classe de concreto).

A correlação apresentou um R^2 razoavelmente alto (0,8317). Apesar de ambos os métodos partirem do mesmo princípio, a alteração na concentração da solução salina e a alteração da tensão aplicada para controle da

temperatura no método nórdico apresentaram influência entre a comparação dos resultados. Embora o coeficiente de determinação não tenha sido tão elevado, é importante notar que as duas normas oferecem resultados que seguem a uma mesma tendência de qualidade de concreto.

Figura 75 – Correlação entre o coeficiente de difusão do cloreto (NT BUILD 492:1999) e a carga passante (ASTM C1202:2017) nas amostras de concreto

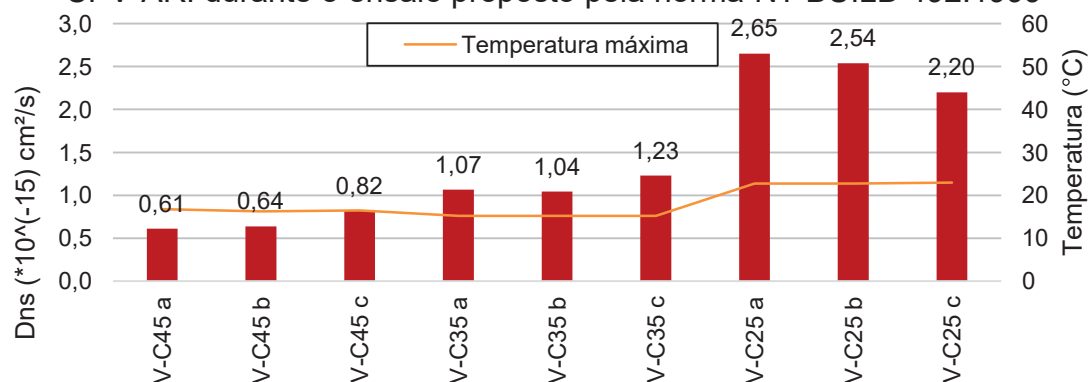


Fonte: O autor (2018)

Mesmo que ambos os métodos tenham apresentado um ensaio acelerado de penetração de cloreto, a principal diferença é o ajuste de tensão na metodologia nórdica, que se traduz na manutenção da temperatura durante o tempo de ensaio, conforme apresentada na Figura 76, na Figura 77 e na Figura 78.

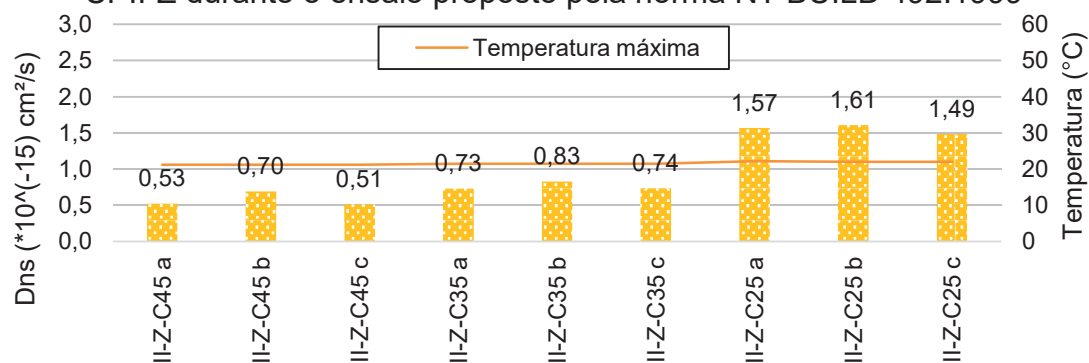
Nesse sentido, é possível verificar que as temperaturas máximas alcançadas em cada amostra ensaiada conforme a NT BUILD 492:1999 – apesar de ainda seguir uma ligeira tendência com os valores de D_{ns} – foi consideravelmente inferior (variando em torno de $20 \pm 5^\circ\text{C}$) que as alcançadas durante o ensaio conforme a ASTM C1202:2017 (em torno de $45 \pm 15^\circ\text{C}$). Para evidenciar o efeito da temperatura, na Figura 79 é apresentada a relação entre os valores de coeficiente de difusão no estado não estacionário e as respectivas temperaturas máximas alcançadas durante o ensaio.

Figura 76 – Temperatura máxima para amostras de concreto com cimento CPV-ARI durante o ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999



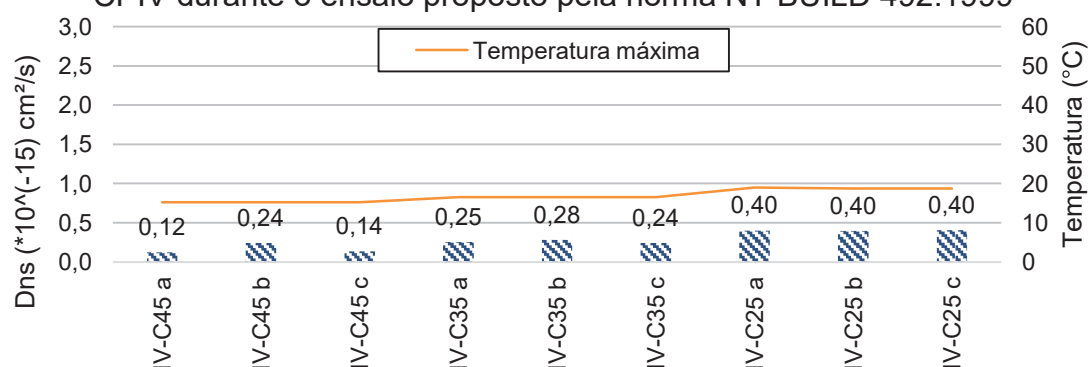
Fonte: O autor (2018)

Figura 77 – Temperatura máxima para amostras de concreto com cimento CPII-Z durante o ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999



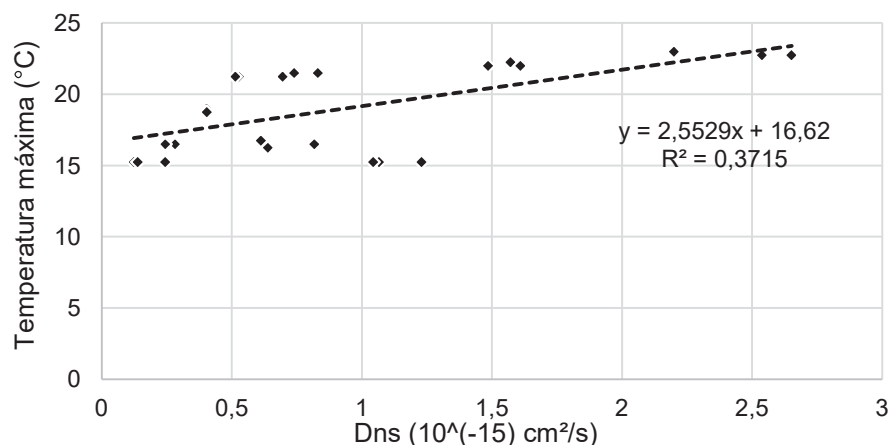
Fonte: O autor (2018)

Figura 78 – Temperatura máxima para amostras de concreto com cimento CPIV durante o ensaio proposto pela norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

Figura 79 – Relação entre a temperatura máxima alcançada com o coeficiente de difusão do cloreto nas amostras de concreto durante o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

É possível, portanto, verificar que, de fato, o ajuste de tensão reduziu a influência da temperatura sobre os resultados finais de D_{ns} , apresentando um coeficiente de determinação fraco, de 0,3715. Essa comparação é importante por convergir com as observações elencadas por Stanish *et al.* (2001), Julio-Betancourt e Hooton (2004) e Thomas *et al.* (2018) a respeito da metodologia americana.

Além disso, quando comparada à norma americana, os ganhos de resistência à penetração de cloreto representados pelo D_{ns} resultante do ensaio proposto pelo método nórdico (Figura 66) se assemelham à diminuição da carga total passante (Figura 58) quando o teor de cinza volante no concreto aumentou. Entretanto, conforme apresentado neste item, tanto o efeito físico quanto o químico contribuíram aos resultados obtidos através da norma NT BUILD 492:1999. No caso da ASTM C1202:2017, a cinética de outros íons que não apenas o Cl^- e o aumento da temperatura foram, também, fatores de influência sobre o resultado final.

Finalmente, a partir da correlação entre os ensaios segundo a metodologia nórdica e a americana (Figura 75), é possível identificar uma nova proposta de classificação sobre a penetrabilidade do cloreto no concreto, a partir do coeficiente de difusão no estado não estacionário. Esta nova classificação é apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 - Classificação do concreto de acordo com o coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário

Carga passante (Coulomb)	Penetrabilidade do íon cloreto (ASTM C1202:2017)	Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário (cm ² /s)
> 4000	Alta	$> 6,9 \cdot 10^{-16}$
2000 - 4000	Moderada	$2,9 \cdot 10^{-16} - 6,9 \cdot 10^{-16}$
1000 - 2000	Baixa	$0,9 \cdot 10^{-16} - 2,9 \cdot 10^{-16}$
100 - 1000	Muito baixa	$0,2 \cdot 10^{-16} - 0,9 \cdot 10^{-16}$
< 100	Negligenciável	$< 0,2 \cdot 10^{-16}$

Fonte: O autor (2018)

Por fim, para garantir os resultados expressados neste estudo e, ainda, conforme explicitado tanto por Simčič *et al.* (2015) quanto por Silva *et al.* (2018), a realização de cura adequada para garantir a hidratação de concretos contendo cinza volante é de extrema importância, sendo um parâmetro fundamental para melhora da durabilidade do material.

6.2.3. AASHTO T259:1980

Os resultados da análise de penetração do cloreto através da precipitação de AgCl no concreto exposto à solução de 3% de NaCl, conforme preconizado pela norma AASHTO T259:1980 são representados pela Figura 80 e apresentados na Figura 81. Para confirmar a diferença entre os resultados obtidos, foi realizada análise de variância com nível de confiabilidade de 95%, conforme indicado na Tabela 22.

Como todas as amostras apresentaram uma diferença significativa entre os resultados de coeficiente de penetração de cloreto no concreto, foi realizada a comparação múltipla de médias, indicando que apenas os concretos IV-C25 e IV-C35 são estatisticamente iguais.

Os resultados concordam com o estudo de Qiao *et al.* (2018), que avaliaram a difusão do cloreto em concretos contendo cinza volante (0, 20, 35 e 50%) e escória de alto forno. Quando continha a adição pozolânica, a penetração de cloreto no material foi menor em comparação ao concreto sem adição. Assim como o apresentado na Figura 81, os resultados de Qiao *et al.*

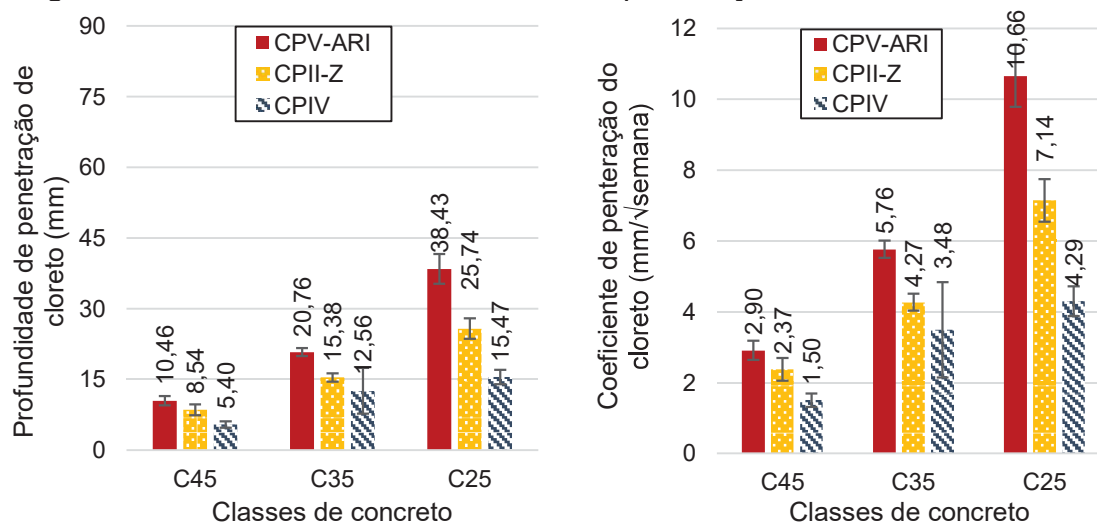
(2018) também apontaram melhora na resistência ao íon conforme se elevou o teor de cinza volante. Segundo os autores, os fatores relevantes sobre os resultados foram o refinamento da microestrutura (efeito físico) e a combinação do cloreto durante o ensaio (efeito químico).

Figura 80 – Precipitado de AgCl nas amostras prismáticas de concreto



Fonte: O autor (2018)

Figura 81 – Profundidade e coeficiente de penetração do cloreto no concreto



Fonte: O autor (2018)

Tabela 22 – ANOVA realizada para o coeficiente de penetração de cloreto no concreto após exposição a solução de 3% de NaCl

Fonte da variação	F calculado	valor-P	F crítico	
Amostra (cimento)	102.7131967	1.4E-10	3.554557	DS
Colunas (f_{cm})	41.6893533	1.8E-07	3.554557	DS
Interações	9.882873083	0.00021	2.927744	DS

DS = Diferença significativa

DNS = Diferença não significativa

Fonte: O autor (2018)

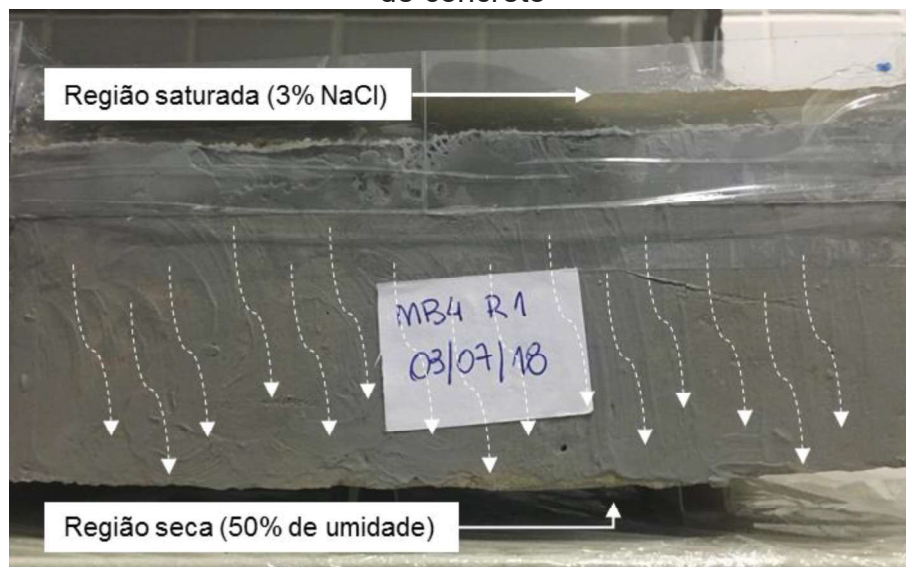
Considerando a existência de diferentes mecanismos de transporte (absorção capilar inicialmente e permeabilidade ao longo do ensaio) do cloreto para o interior do concreto presentes no método proposto pela AASHTO T259:1980, ao longo do tempo de exposição à solução de 3% de NaCl, pode-se dizer que a análise da difusão iônica não ocorre de maneira isolada. Além disso, a condição ambiental com baixa umidade relativa (50%) da face da amostra oposta ao contato com a solução de cloreto proporciona uma dinâmica permanente de absorção do líquido pelas regiões mais internas do concreto. Aliado ao condicionamento prévio à exposição ao cloreto de 28 dias em câmara seca, McGrath e Hooton (1999) também mencionaram tais influências como possível alteração nos mecanismos de transporte. Na Figura 82, é apresentado o esquema de condição de exposição do concreto em relação à umidade relativa e do sentido de movimentação da solução no interior do material durante o ensaio proposto pela norma AASHTO T259:1980.

Por fim, a condição de umidade relativa em torno de 50% na face oposta à solução de 3% de NaCl cria um gradiente de umidade no concreto que contribui para aumentar a velocidade de absorção do concreto, transportando vapor pelo interior do material, da região úmida à região mais seca, exposta ao ambiente (uma vez que as laterais estão seladas com material impermeabilizante). Isso causa maior transporte de líquido no material ao longo do ensaio e é chamado de efeito *wicking*, de acordo com Stanish *et al.* (2001).

Segundo Puyate *et al.* (1998), o efeito *wicking* envolve, além do transporte de vapor, água e cloreto via absorção capilar, permeabilidade e difusão iônica, a combinação do cloreto e até a precipitação de sal nos poros

(dependendo da concentração de NaCl na solução de exposição). Ainda, após a saturação do concreto sujeito ao efeito wicking, os autores demonstraram em seu estudo que o cloreto atinge um estado estacionário de difusão (modelo idealizado para análise de um coeficiente de difusão de maneira natural).

Figura 82 – Esquema de representação da penetração de cloreto na amostra de concreto



Fonte: O autor (2018)

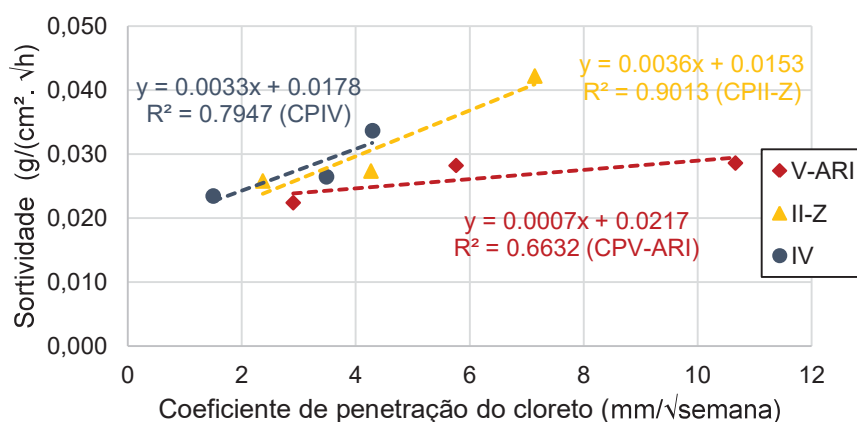
Stanish *et al.* (2001) destacam, ainda, que o efeito *wicking* ocorrendo numa estrutura real dura um tempo menor – assim como a existência de um gradiente de umidade – do que os 90 dias propostos pela AASHTO T259:1980. Dessa forma, considerando a penetração de cloreto numa estrutura de concreto, a difusão do íon ao longo da vida útil do material seria um mecanismo predominante de ingresso em comparação ao seu transporte por absorção capilar, que seria um mecanismo inicial ou sob determinadas condições.

Por fim, Qiao *et al.* (2018) também compararam a profundidade de penetração de cloreto no concreto através da difusão e do efeito *wicking*, concluindo que o cloreto ingressou mais internamente a partir deste mecanismo; os autores atribuíram à evaporação a causa dos resultados. Ou seja, a metodologia de ensaio segundo a norma AASHTO T259:1980 não representa um fenômeno natural de difusão do cloreto, mas uma combinação

de mecanismos de transporte que refletem sobre os resultados ao final da análise.

No sentido de analisar a maior influência da absorção capilar sobre o tipo de cimento utilizado para moldar o concreto, foi realizada uma correlação dos parâmetros de sortividade e coeficiente de penetração do cloreto para cada tipo de aglomerante, apresentado na Figura 83.

Figura 83 – Correlação entre a sortividade e o coeficiente de penetração do cloreto em função do tipo de aglomerante

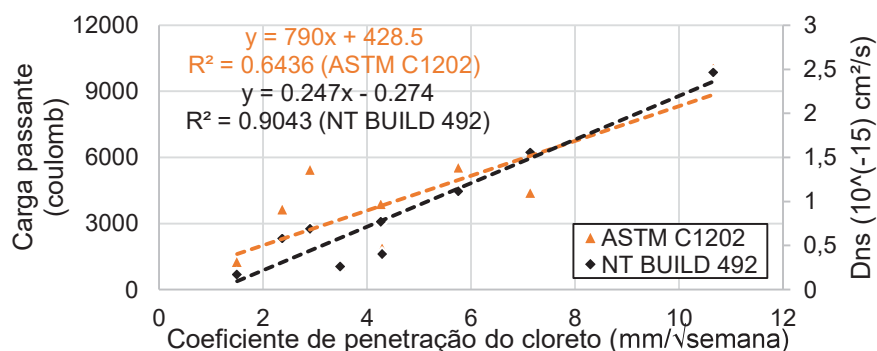


Fonte: O autor (2018)

Quando compararam a diferença de profundidade de penetração de cloreto alcançada via difusão ou efeito *wicking*, Qiao *et al.* (2018) encontraram uma grande variação nos resultados de concreto sem adição, de até 15 mm. No entanto, os autores mostraram que essa diferença de profundidade para um concreto contendo adição (independentemente do teor e do tipo) foi menor – inferior a 5 mm. Quando comparados os coeficientes de determinação em função do tipo de cimento, as amostras contendo CPII-Z ($R^2=0,9013$) e CPIV ($R^2=0,7947$) apresentaram uma correlação ligeiramente superior em relação às aquelas contendo CPV-ARI ($R^2=0,6632$). Segundo Qiao *et al.* (2018) e complementado por Hoppe Filho *et al.* (2013), o refinamento da microestrutura desses concretos resulta num maior grau de saturação, refletindo num fluxo de convecção do vapor mais fraco que o que ocorre no concreto sem adição, o que justificaria uma redução da penetração do cloreto no concreto sujeito ao efeito *wicking*.

Em outra análise, os resultados provenientes do ensaio conforme a AASHTO T259:1980 foram comparados com os dois procedimentos acelerados (ASTM C1202:2017 e NT BUILD 492:1999) e apresentados na Figura 84.

Figura 84 – Correlação entre o coeficiente de penetração do cloreto (AASHTO T259:1980), a carga passante e o coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário



Fonte: O autor (2018)

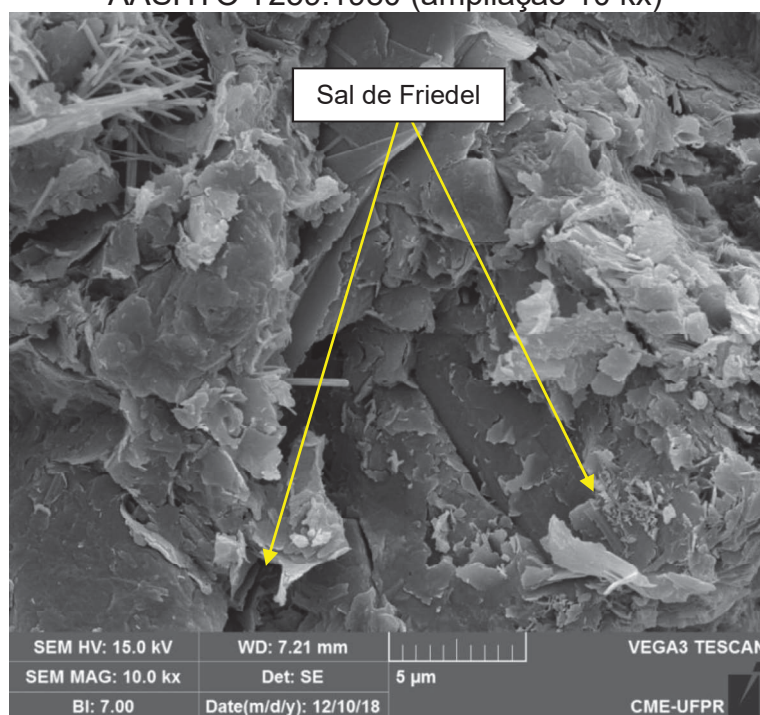
Apesar de a norma ASTM C1202:2017 citar boa correlação com o ensaio da norma AASHTO T259:1980, o coeficiente de determinação não apresentou uma correlação tão forte quanto o da norma nórdica. De acordo com McGrath e Hooton (1999), a relação entre a condutividade iônica (ASTM) e o coeficiente de difusão aparente (AASHTO) seria linear se fosse possível garantir que a solução dos poros do concreto, o efeito wicking, a formação de cloroaluminatos e a alteração na concentração da solução não ocorressem durante os ensaios.

De maneira contrária ao exposto, Thomas *et al.* (2018) apresentaram uma forte correlação entre os métodos propostos pela ASTM C1202 e AASHTO T259. Uma explicação apontada pelos autores faz relação ao aglomerante utilizado como influência na leitura de corrente, principalmente devido à análise química dos poros do concreto. Além disso, o estudo de Thomas *et al.* (2018) foi realizado com cura de 28 dias para o início de ambos os ensaios. Nesse sentido, outra discussão é levantada pelos autores: o tempo de exposição ao cloreto pelo método de contenção de solução é superior ao ensaio de migração rápida, o que pode refletir numa maior resistência do concreto devido ao grau de hidratação.

Com relação à formação de sal de Friedel e de Kuzel, McGrath e Hooton (1999) sugerem que, mesmo que não haja tempo de combinação do cloreto em ensaios acelerados por aplicação de tensão externa, estes ensaios ainda podem ser úteis como estimativa de penetração do íon no concreto a longo prazo.

No presente estudo, é possível verificar a formação de cloroaluminato principalmente nas amostras V-C35 (Figura 85) e II-Z-C35 (Figura 87). O aspecto pouco regular e escamoso da amostra com CPV-ARI pode ser verificado no estudo de Ma *et al.* (2018) e Kopecskó (2006), apresentados na Figura 86. Na imagem com ampliação de 10 kx da amostra contendo cimento CPII-Z, o sistema sobreposto e escamoso se assemelha às imagens do estudo de Ma *et al.* (2009), representado anteriormente na Figura 72.

Figura 85 – MEV de amostra V-C35, após exposição conforme a norma AASHTO T259:1980 (ampliação 10 kx)

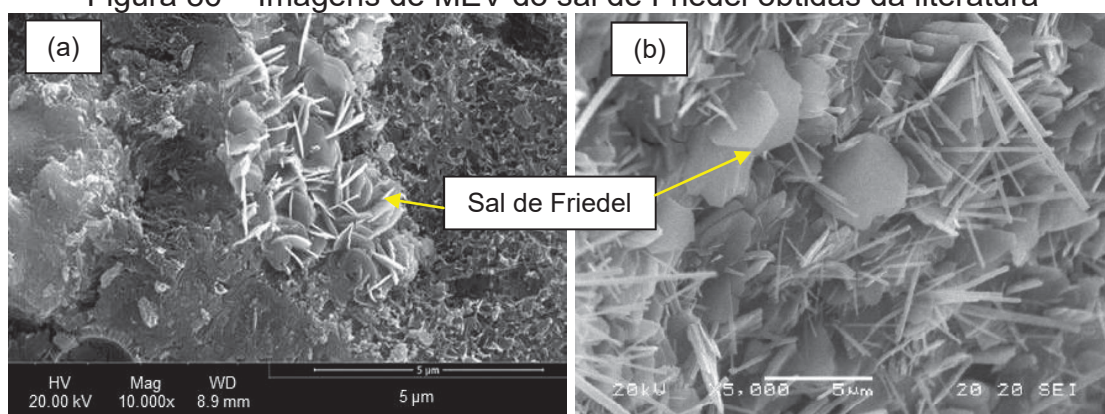


Fonte: O autor (2018)

Apesar das imagens de sal de Friedel apresentadas, Ma *et al.* (2015) indicaram alteração morfológica do cloroaluminato de acordo com a variação da temperatura. De fato, se levar em consideração a estrutura física dos

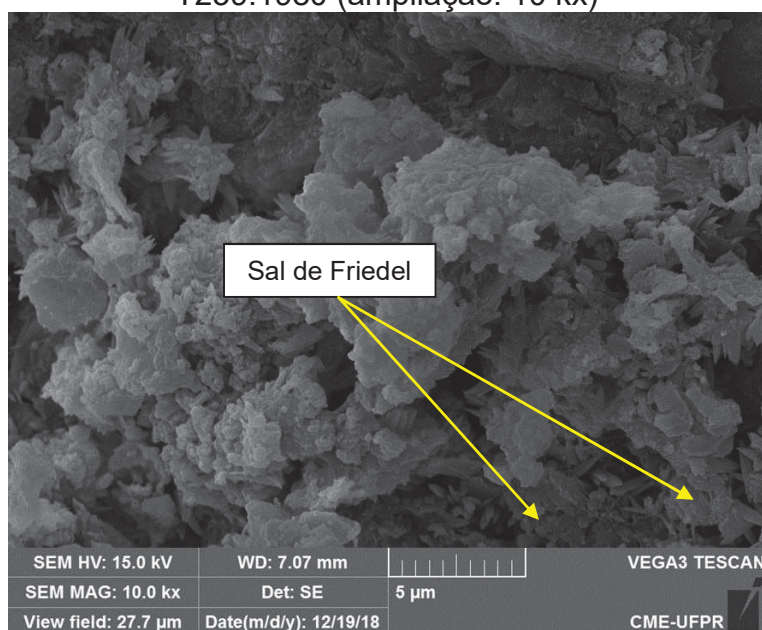
diferentes concretos, a distribuição térmica durante os ensaios (incluindo, nesta análise, as imagens de MEV das amostras submetidas ao método acelerado nórdico) pode se distribuir de maneira diversa. Entretanto, para a confirmação da hipótese da alteração morfológica do sal de Friedel no presente estudo devido ao efeito da temperatura, mais informações seriam necessárias, como uma análise de microscopia eletrônica de varredura de amostras com variação da temperatura durante a exposição do concreto ao cloreto.

Figura 86 – Imagens de MEV do sal de Friedel obtidas da literatura



Fonte: (a) Ma *et al.* (2018) e (b) Kopecskó (2006)

Figura 87 – MEV de amostra II-Z-C35, após exposição conforme AASHTO T259:1980 (ampliação: 10 kx)



Fonte: O autor (2018)

6.2.4. NT BUILD 443:1995

As imagens das amostras de concreto após a exposição durante 90 dias à solução de 16,5% de NaCl, seccionadas longitudinalmente, são apresentadas na Figura 88, logo após a aspersão de nitrato de prata e precipitação de cloreto de prata. Os resultados de profundidade e coeficiente de penetração do cloreto no concreto são apresentados na Figura 89.

Figura 88 – Precipitado de AgCl nas amostras de concreto

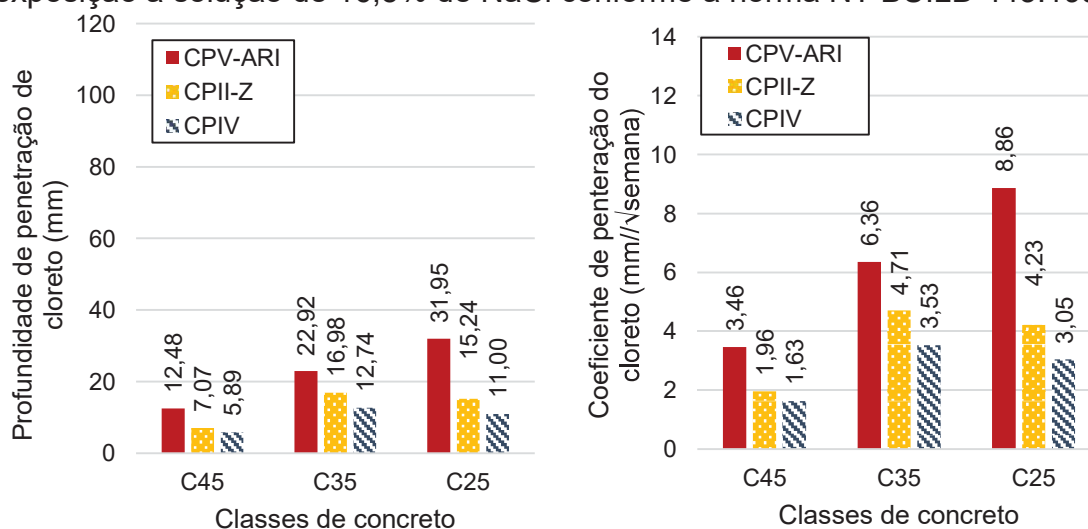


Fonte: O autor (2018)

Como o número de amostras utilizadas para o ensaio conforme o método nórdico de análise natural do ingresso de cloreto no concreto foi inferior a três, não foi possível realizar uma análise estatística dos resultados apresentados. Dessa forma, os valores apresentados são absolutos, representando a média das leituras de AgCl no concreto, realizada de acordo com o proposto pelo método da norma NT BUILD 492:1999 (Figura 30).

Os estudos de Mittri (2016) e Guignone (2017) também apresentaram os resultados do ensaio proposto pela norma nórdica NT BUILD 443:1995 em função da profundidade de penetração de cloreto no concreto como alternativa à proposta do desenvolvimento do gráfico de perfil de cloreto.

Figura 89 – Profundidade de penetração de cloreto de amostras após exposição a solução de 16,5% de NaCl conforme a norma NT BUILD 443:1995



Fonte: O autor (2018)

A análise inicial dos resultados demonstra a mesma tendência inversa do aumento do teor de cinza volante sobre os resultados de penetração de cloreto. Assim como nos resultados de ingresso do íon segundo o método proposto pela norma AASHTO T259:1980 (também de longa duração), não apenas o efeito físico de refinamento dos poros e diminuição da porosidade, mas também a combinação do cloreto na matriz cimentícia proporcionados pela adição pozolânica foram responsáveis pela redução no coeficiente de penetração de cloreto no concreto.

Sabet *et al.* (2013), a partir do ensaio proposto pela NT BUILD 443:1995, porém realizado por 90 dias de exposição, apresentaram uma redução no teor de cloreto no concreto conforme aumentou a adição de cinza volante de 0 para 10 e de 10 para 20%, até uma profundidade de 20 mm. Apesar de os concretos dosados com adição pozolânica terem apresentado um coeficiente de difusão inferior aos concretos sem adição, a concentração superficial de cloreto foi maior nas amostras que continham cinza volante. De acordo com os autores, a ação física da pozolana e a combinação do íon nessa região foram responsáveis pela concentração apresentada. O estudo de Nath *et al.* (2018) apresentou a mesma situação na região superficial das amostras de concreto.

A melhoria na microestrutura do concreto proporcionada pela cinza volante relacionada ao efeito fíler é apontada como uma das principais responsáveis pela diminuição do coeficiente de difusão do cloreto, apontados no estudo de Nath *et al.* (2018). Os autores, através da norma nórdica de ensaio natural de difusão do cloreto (NT BUILD 443), apresentaram uma melhora um pouco mais significativa no parâmetro quando a adição de cinza volante foi de 30% em relação ao aumento de 40%. Relacionando tal informação com os estudos de Aponte *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2018), discutidos no item 6.2.2, pode-se dizer que a faixa de adição de cinza volante onde é possível encontrar um teor ótimo da pozolana no concreto para a melhoria da resistência à penetração do cloreto oscila entre 30 e 40%. Apesar da necessidade de se avaliarem a origem e composição química da adição mineral para determinar com maior rigor esta faixa, tal variação apresentada é uma resultante da comparação de diferentes estudos de penetração de cloreto no concreto, servindo, principalmente, como uma orientação a respeito do teor de cinza volante onde é possível encontrar uma menor difusividade do íon em ambientes agressivos.

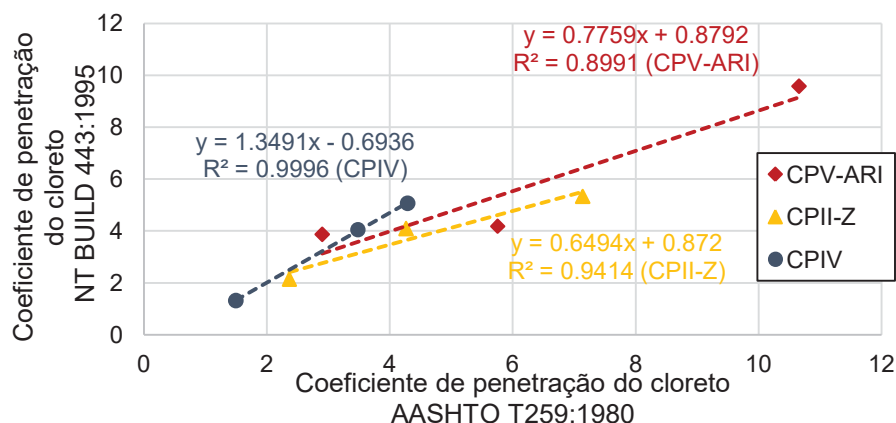
Com relação às diferenças apresentadas na Figura 89, houve uma redução mais significativa dos coeficientes de penetração das amostras V-C45 e V-C25, comparados com as respectivas amostras contendo cinza volante. O aumento da adição pozolânica de 12,5% para 27% apresentou, no entanto, menor variação do parâmetro.

Em comparação à norma americana de ensaio natural de difusão do cloreto no concreto (AASHTO T259:1980), a norma NT BUILD 443:1995 considera a condição de saturação do concreto previamente à exposição ao cloreto. Dessa forma, a absorção capilar inicial e o efeito wicking são suprimidos durante o método nórdico. Além disso, pelo fato de as amostras permanecerem submersas, não há outro fator de influência sobre o mecanismo de transporte do cloreto para o concreto, sendo predominante a ocorrência da difusão. Para verificar a compatibilidade entre os ensaios, na Figura 90, é apresentada uma correlação entre os coeficientes de penetração do cloreto.

Mesmo com as considerações a respeito da metodologia proposta pelo método de contenção da solução de cloreto da AASHTO T259:1980, o R^2 das

amostras de concreto moldadas com um mesmo tipo de aglomerante evidenciou uma forte correlação com a análise segundo o método nórdico de exposição à solução de cloreto de sódio. Ainda assim, deve-se salientar que as análises são referentes ao ensaio colorimétrico por aspersão de nitrato de prata. Nesse sentido, a grande diferença de concentração entre as soluções (3% de NaCl no método americano contra 16,5% de NaCl no método nórdico) pode influenciar mais significativamente parâmetros como o coeficiente de difusão do cloreto, o que também foi destacado por Jen *et al.* (2017). Ainda, o estudo de Otsuki *et al.* (1992) sobre a utilização de AgNO_3 para identificação do cloreto não evidencia o teor máximo do íon para combinação com a prata, o que poderia resultar em cloreto extra nas amostras e que não reagiram com o íon metálico. Para isso, contudo, novos estudos precisam ser realizados para comprovar tal teoria, alterando a concentração da solução de nitrato de prata de modo a verificar o limite máximo de combinação para formação de cloreto de prata. Ainda, paralelo a tal análise, o estudo de Mesbah *et al.* (2011) sugere que a combinação do cloreto para a formação de sal de Friedel ocorre sob exposição de grande concentração de cloreto. Novamente, uma análise específica da concentração salina de exposição do concreto pode auxiliar na identificação dos limites de leitura da precipitação de AgCl bem como verificar a influência do teor de Cl^- na formação de cloroaluminato através de técnicas como DRX e MEV.

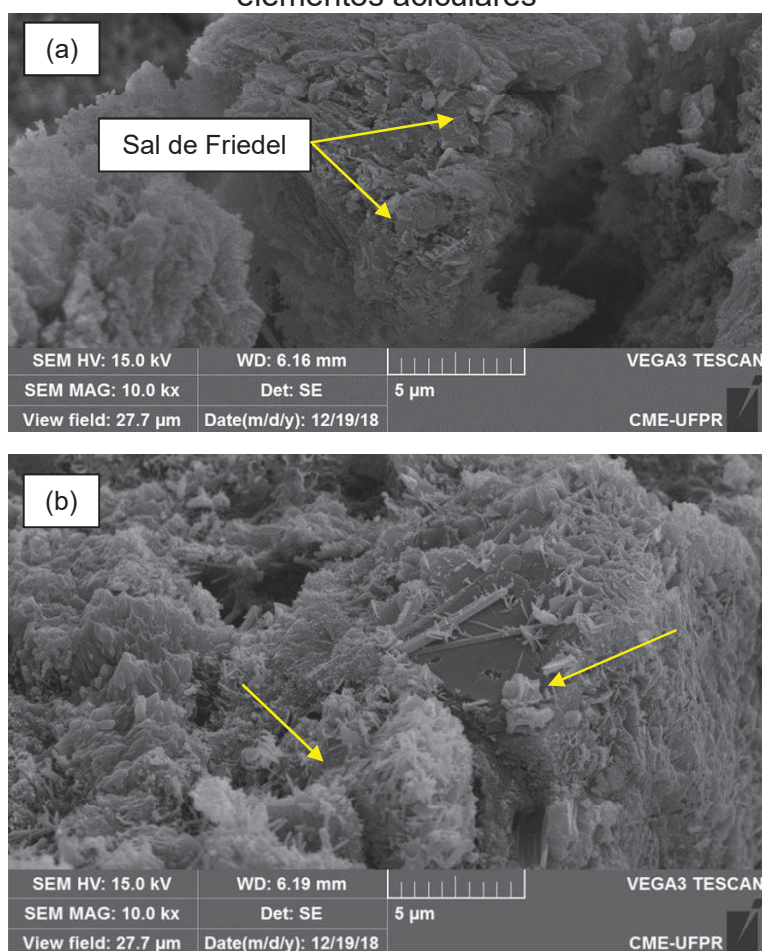
Figura 90 – Correlação entre os coeficientes de penetração do cloreto segundo as normas NT BUILD 443:1995 e AASHTO T259:1980



Fonte: O autor (2018)

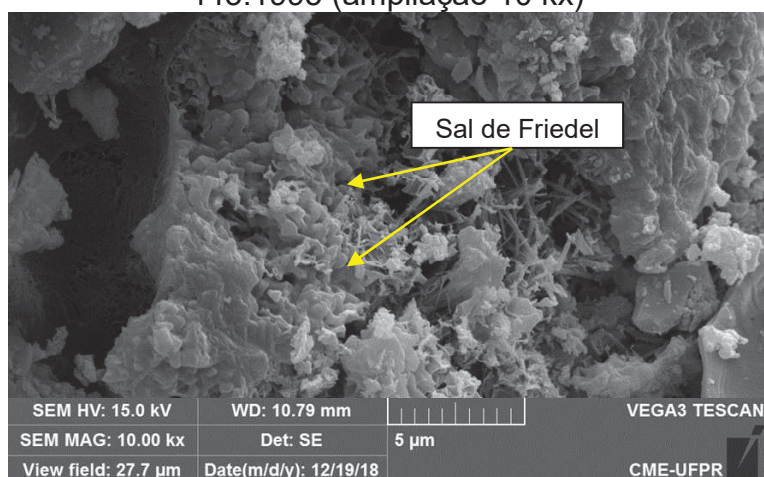
Já no contexto da formação dos sais de Friedel e Kuzel, assim como a análise segundo o método proposto pela AASHTO T259:1980, o ensaio conforme a NT BUILD 443:1995 prevê a exposição do concreto por um tempo maior de exposição ao cloreto, em comparação às normas de ensaios acelerados ASTM C1202:2017 e NT BUILD 492:1999. Entende-se, portanto, que haja a formação de cloroaluminato e cloro-sulfoaluminato no concreto durante o ensaio. Para verificar esta hipótese, foram geradas as imagens através da microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 10 kx, das amostras C35 para os o concreto contendo CPV-ARI (Figura 91), CPII-Z (Figura 92) e CPIV (Figura 93).

Figura 91 – MEV de amostra V-C35, após exposição conforme NT BUILD 443:1995 (ampliação 10 kx): (a) sal de Friedel e (b) estrutura contendo elementos aciculares



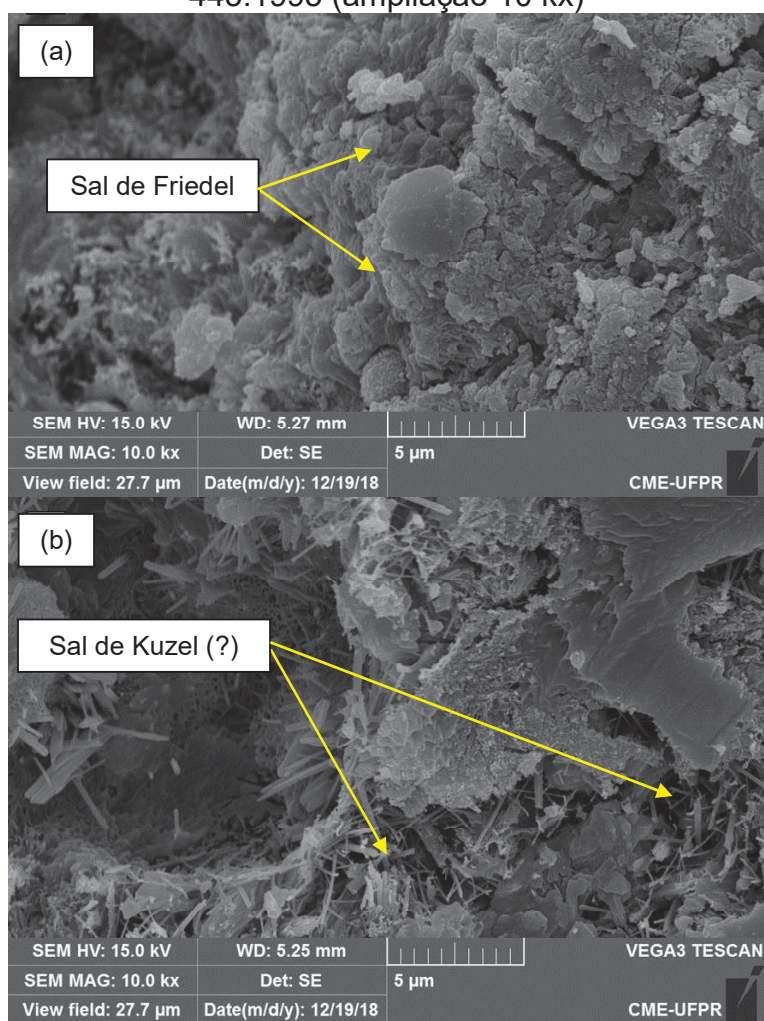
Fonte: O autor (2018)

Figura 92 – MEV de amostra II-Z-C35, após exposição conforme NT BUILD 443:1995 (ampliação 10 kx)



Fonte: O autor (2018)

Figura 93 – MEV de amostra IV-C35, após exposição conforme NT BUILD 443:1995 (ampliação 10 kx)



Fonte: O autor (2018)

A partir da comparação das imagens apresentadas com outros estudos, é possível confirmar a existência de sal de Friedel. A principal característica das amostras apresentadas nas figuras “a” é referente ao complexo escamoso mencionado por Ma et al. (2018), apresentado na Figura 86. É possível fazer uma analogia direta desta estrutura, presente nas três amostras (V-C35, II-Z-C35 e IV-C35), com os trabalhos de Ma et al. (2009) e Zhang et al. (2011), expostos na Figura 72.

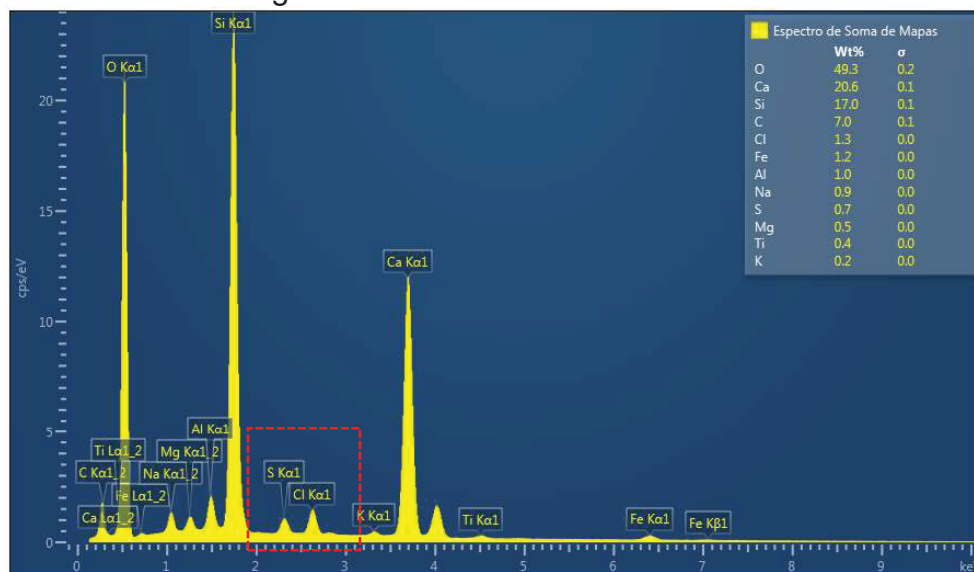
Além do cloroaluminato, é possível identificar estruturas em formato de pequenas agulhas nas imagens “b” das amostras V-C35 (Figura 91) e CPIV (Figura 93). Ma et al. (2018) apresentaram, além das estruturas hexagonais como sal de Friedel, pequenas agulhas ligadas a alguns destes sistemas hexagonais, pouco definidas e diferentes dos cristais de etringita. Embora os autores não tenham identificado tais complexos como sendo o cloro-sulfoaluminato, através da difração de raios-X eles identificaram um pequeno pico de sal de Kuzel, próximo ao pico referente ao sal de Friedel (Figura 5). Mesmo não tendo sido encontradas referências morfológicas precisas a respeito do cloro-sulfoaluminato, sua estrutura química ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,5\text{CaCl}_2 \cdot 0,5\text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), composta por meia molécula de sulfato de cálcio, sugere uma comparação à morfologia acicular da etringita ($\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Essa hipótese sugere que os cristais hexagonais com agulhas apresentados neste estudo e no trabalho de Ma et al. (2018) podem ser o sal de Kuzel.

Complementando o estudo de Ma et al. (2018), no trabalho de Mesbah et al. (2011), o sal de Kuzel é definido como um composto com duas camadas intercaladas ora com cloro, ora com moléculas de sulfato, sendo morfológicamente apresentada como uma interação da estrutura do sal de Friedel com a estrutura do monossulfoaluminato (AFm).

De fato, através do mapeamento de espectroscopia por dispersão em energia (EDS) das amostras V-C35 (Figura 94), II-Z-C35 (Figura 95) e IV-C35 (Figura 96), foi possível identificar um teor considerável de cloro e enxofre (diferente do apresentado nos gráficos de EDS das amostras do ensaio da NT BUILD 492:1999), entre outros elementos presentes na molécula do sal de Friedel, o que levanta mais um ponto de convergência à existência do sal de

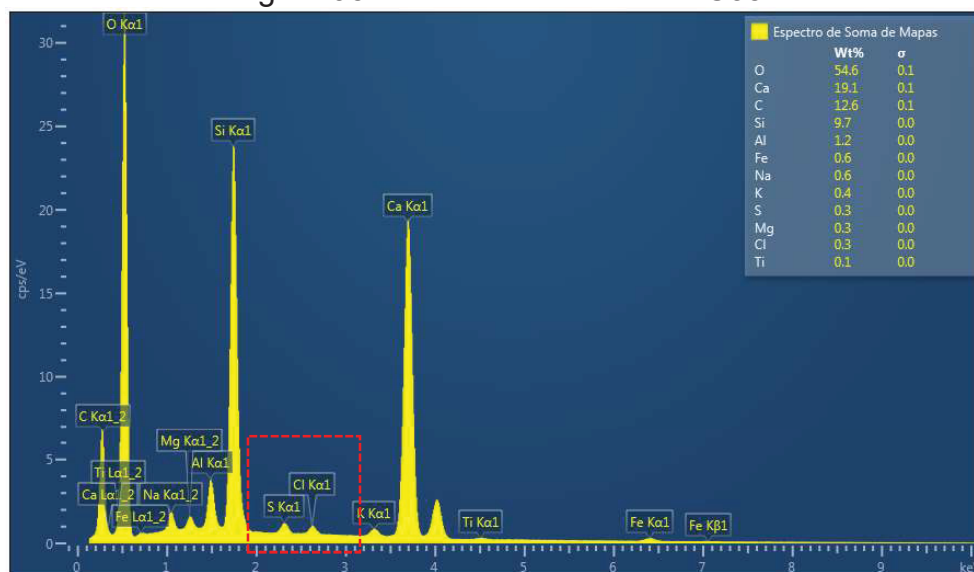
cloro-sulfoaluminato no concreto. Como o mapeamento por EDS não está vinculado às imagens de MEV, o cálculo estequiométrico dos elementos apresentados não permite afirmar com precisão se eles são, de fato, referentes ao cloro-sulfoaluminato. Novamente, maiores estudos para determinação dos elementos químicos presentes na amostra de concreto são necessários para confirmar a presença dos sais.

Figura 94 – EDS de amostra V-C35



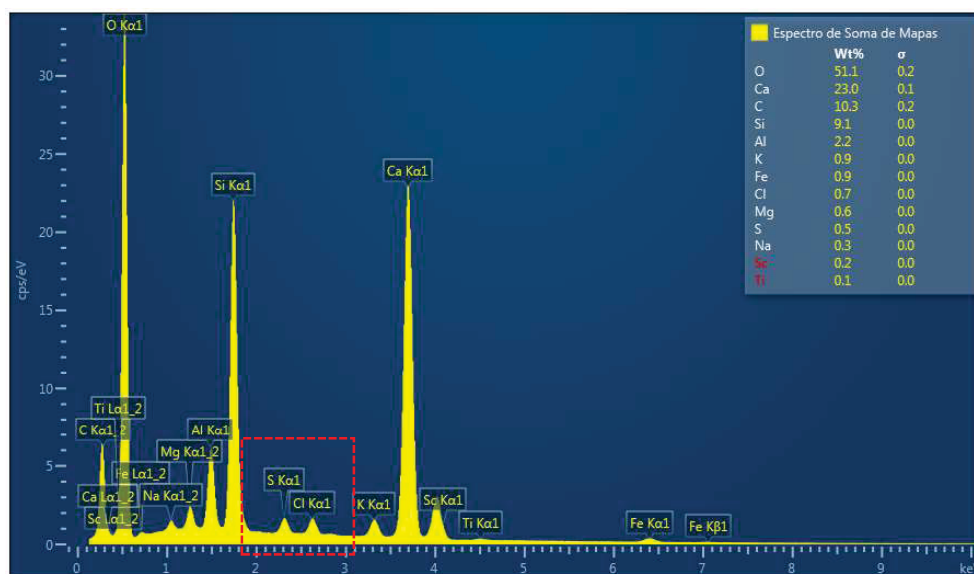
Fonte: O autor (2018)

Figura 95 – EDS de amostra II-Z-C35



Fonte: O autor (2018)

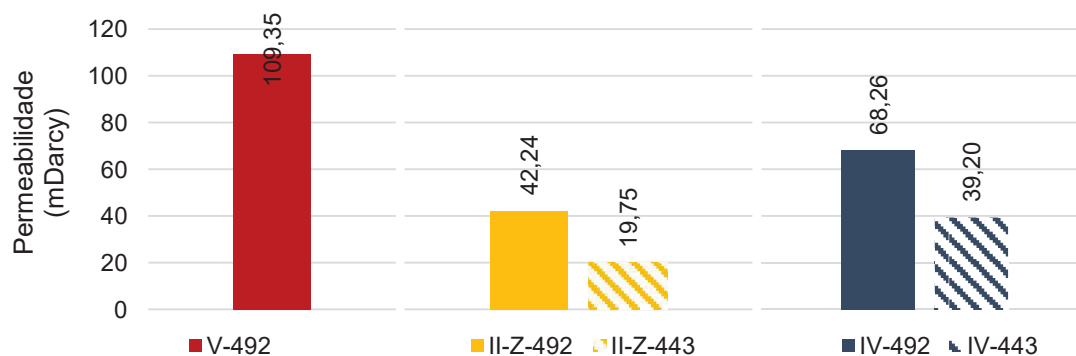
Figura 96 – EDS de amostra IV-C35



Fonte: O autor (2018)

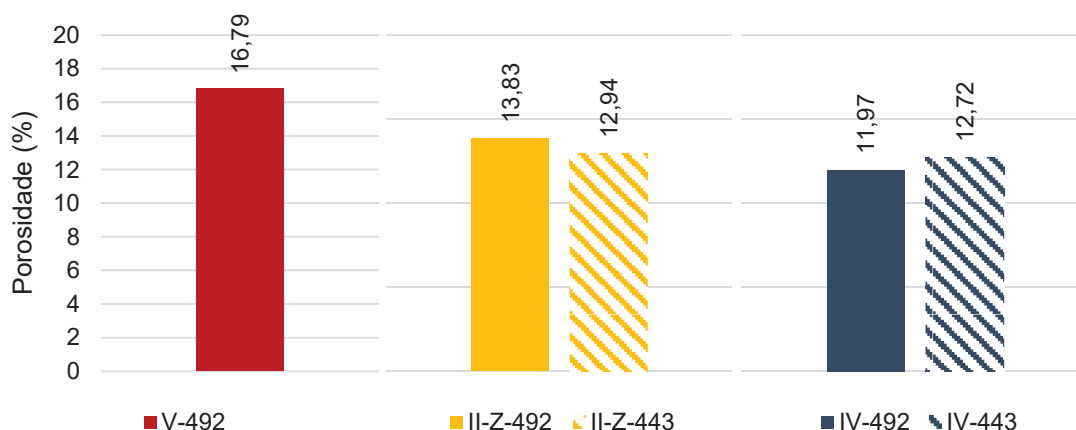
Com relação à comparação dos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio das amostras referentes aos métodos nórdicos (acelerado e natural), os resultados de permeabilidade e porosidade são apresentados, respectivamente, na Figura 97 e Figura 98. Os resultados referentes à amostra V-C35 ensaiadas conforme o método da NT BUILD 443:1995 não foram utilizados devido a problemas na realização do ensaio de PIM.

Figura 97 – Permeabilidade das amostras referentes aos ensaios NT BUILD 492:1999 e NT BUILD 443:1995



Fonte: O autor (2018)

Figura 98 – Porosidade das amostras referentes aos ensaios NT BUILD 492:1999 e NT BUILD 443:1995



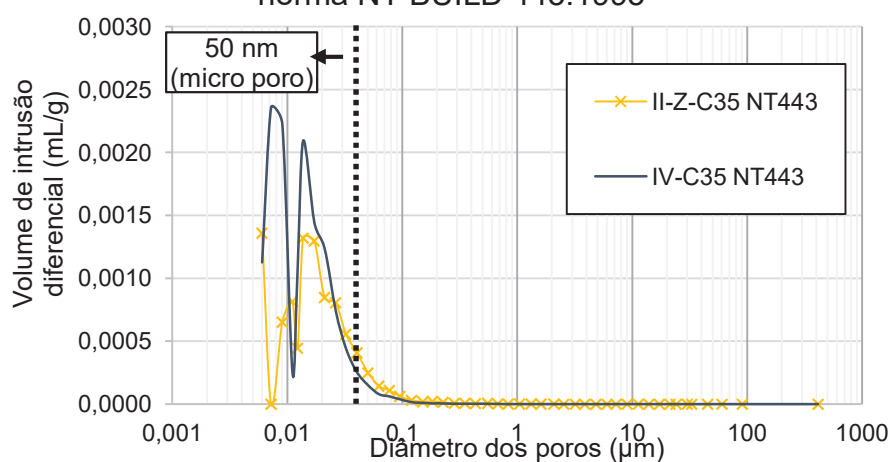
Fonte: O autor (2018)

É possível verificar a redução na permeabilidade das amostras após o ensaio nórdico de longa duração de exposição ao cloreto, em comparação às amostras expostas ao ensaio nórdico acelerado. Isso poderia sugerir um efeito físico semelhante ao da carbonatação, de colmatação dos poros. Entretanto, a porosidade das amostras não variou na mesma tendência quando a mesma comparação é realizada, mostrando uma aparente estagnação na porcentagem de poros do concreto.

A distribuição do diâmetro dos poros dessas amostras em função do volume de intrusão diferencial, é apresentada na Figura 99 e na Figura 100, onde é possível verificar que a maior distribuição dos poros para os três tipos de concreto se caracteriza como micro poro (inferior a 50 nm).

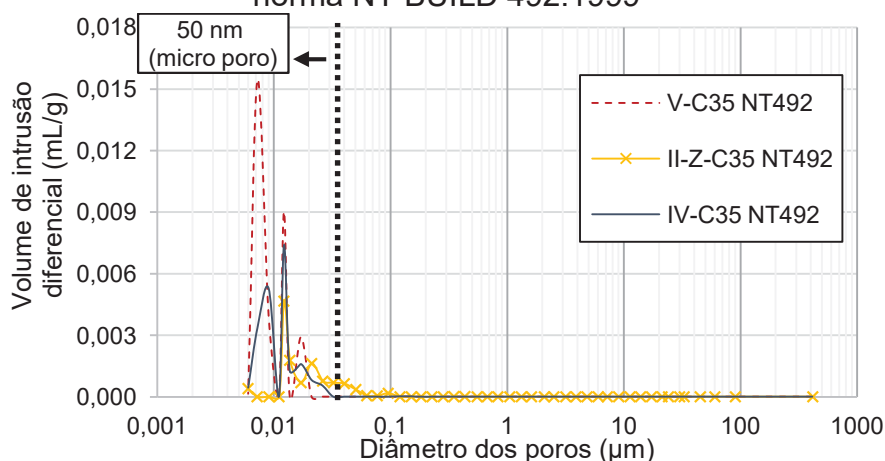
Mesmo que as amostras provenientes da exposição dos dois ensaios tenham apresentado maior quantidade de micro poros (diâmetro inferior a 50 nm), pode-se verificar que o volume de intrusão no concreto exposto ao ensaio de longa duração foi menor que no concreto exposto ao ensaio acelerado. Para analisar o efeito da dimensão dos poros sobre as amostras de ambos os métodos, na Figura 101 e na Figura 102 é exposto o volume de intrusão acumulado em função da pressão aplicada durante a intrusão e extrusão do mercúrio, conforme o ensaio de PIM.

Figura 99 – Distribuição dos poros do concreto após o ensaio conforme a norma NT BUILD 443:1995



Fonte: O autor (2018)

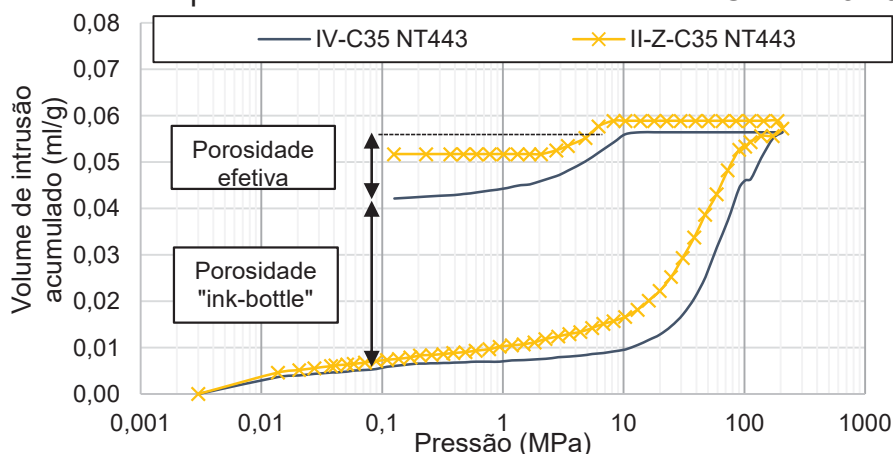
Figura 100 – Distribuição dos poros do concreto após o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

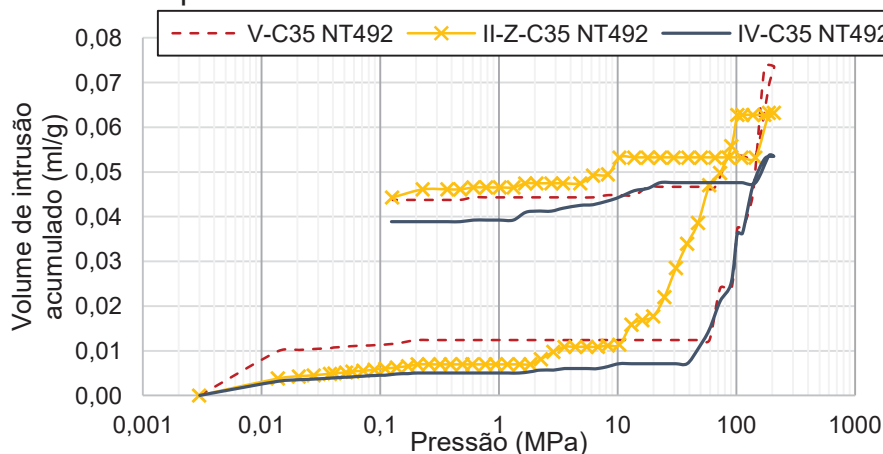
É possível identificar, ao final da extrusão, um “resíduo” no gráfico, referente ao mercúrio remanescente no interior do concreto, que não consegue sair facilmente. Esse volume de mercúrio é referente à quantidade do líquido que penetrou nos poros através de aberturas muito estreitas e não consegue sair durante a extrusão. Esses poros são denominados, na literatura, como poros “*ink-bottle*”, representando poros de difícil acesso (MORO e BÖHNI, 2002).

Figura 101 – Volume de intrusão de mercúrio acumulado em função da pressão nas amostras após o ensaio conforme a norma NT BUILD 443:1995



Fonte: O autor (2018)

Figura 102 – Volume de intrusão de mercúrio acumulado em função da pressão nas amostras após o ensaio conforme a norma NT BUILD 492:1999



Fonte: O autor (2018)

De acordo com Simčič *et al.* (2015), amostras contendo cinza volante tem um efeito de refinamento de seus poros, o que reflete no aumento do percentual de poros “*ink-bottle*” e consequente redução na porosidade efetiva. Nesse contexto, uma maior quantidade deste tipo de poro aumenta a resistência do concreto em relação à penetração de cloreto – o que converge com a ideia de aumento da durabilidade do material, discutida, também, no estudo de Hoppe Filho *et al.* (2013). Para exemplificar, os resultados de porosidade efetiva e “*ink-bottle*” das amostras ensaiadas conforme a norma NT

BUILD 492:1999, e submetidas ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Porosidade efetiva e “ink-bottle” das amostras de concreto

	V-C35 NT492	II-Z-C35 NT492	IV-C35 NT492
Porosidade efetiva	40,59%	29,98%	27,28%
Porosidade “ink-bottle”	59,41%	70,02%	72,72%

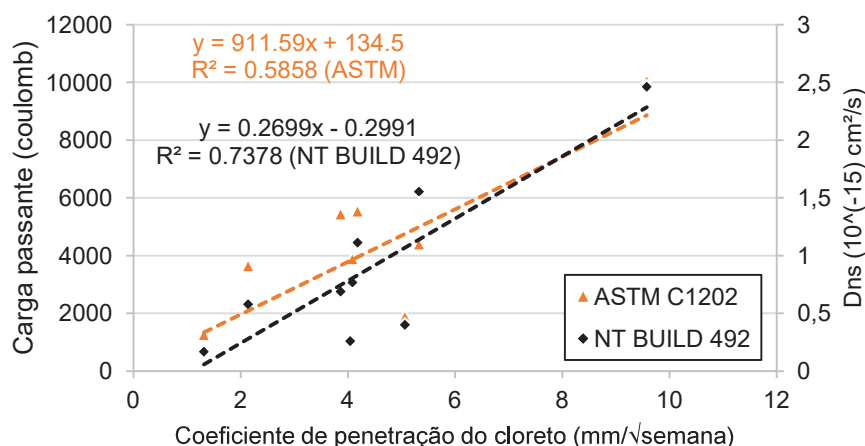
Fonte: O autor (2018)

De fato, as amostras sem adição (V-C35) do ensaio nórdico acelerado apresentaram uma porosidade efetiva superior em relação às demais. Ainda, o aumento dos poros “*ink-bottle*” para as amostras contendo cinza volante, em relação àquelas sem a adição pozolânica, pode sugerir que houve alguma alteração física e/ou química na matriz cimentícia, possivelmente devido à possibilidade de formação de novos compostos quando em contato com o cloreto.

Numa outra análise, comparados os resultados de coeficiente de penetração de cloreto com a carga passante (ASTM C1202:2017) e o coeficiente de difusão no estado não estacionário (NT BUILD 492:1999), é gerada a correlação apresentada na Figura 103.

Dehghan *et al.* (2017) afirmam que não é possível comparar os resultados dos métodos nórdicos (natural e acelerado), dadas as condições diversas de comparação (geometria da amostra, tempo de duração, concentração de NaCl, tensão externa aplicada). Entretanto, os autores encontraram uma tendência de proporcionalidade, mesmo que não seja precisa. Essa mesma tendência é apresentada na Figura 103, com um razoável coeficiente de determinação. Já a comparação com o método acelerado americano, a correlação foi mais fraca, podendo ser atrelada às questões da temperatura e formação de cloroaluminatos discutidas no item 6.2.1.

Figura 103 – Correlação entre o coeficiente de penetração do cloreto (NT BUILD 443:1995), a carga passante e o coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário



Fonte: O autor (2018)

No estudo de Jen *et al.* (2017), os autores relacionam os resultados de ensaios acelerados (NT BUILD 492:1999) ao refinamento dos poros como propriedade regente da mobilidade iônica no concreto, enquanto que nos ensaios de longa duração (NT BUILD 443:1995), a combinação do cloreto na matriz cimentícia se torna o fator predominante à resistência do material. Convergindo ao exposto por Jen *et al.* (2017), mesmo nos resultados do presente estudo provenientes do método acelerado nórdico (item 6.2.2), pode-se dizer que a formação de cloroaluminato foi mais modesta quando comparada às imagens de MEV apresentadas pelas amostras advindas dos métodos naturais (itens 6.2.3 e 6.2.4). Nesse contexto, é razoável considerar uma relação de tendência entre todos os resultados dos ensaios utilizados neste estudo, porém não é possível correlacioná-los precisamente.

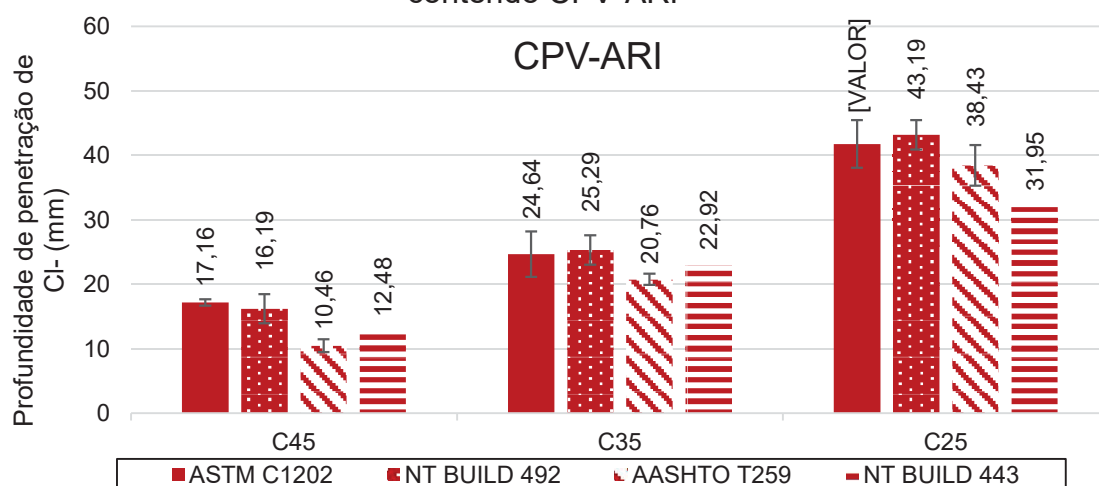
6.3. CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS COLORIMÉTRICOS

Finalmente, a partir dos resultados obtidos dos ensaios no item 6.2 deste trabalho, é possível realizar uma comparação a respeito da classificação do concreto em relação à penetração do cloreto. Os resultados se baseiam, principalmente, na profundidade de penetração do íon, visível através da

aspersão de solução de 0,1 mol/L de AgNO_3 . Entretanto, dos ensaios acelerados, é possível obter parâmetros como carga passante e coeficiente de difusão no estado não estacionário, apresentando valores de referência originários da norma ASTM C1202:2017 e Gjrv (2009) *apud Celik et al.* (2015).

O resumo dos resultados médios de penetração de cloreto no concreto, provenientes dos ensaios propostos pelas normas ASTM C1202:2017, AASHTO T259:1980, NT BUILD 492:1999 e NT BUILD 443:1995, em função do traço da amostra e do tipo de aglomerante utilizado, é apresentado na Figura 104, na Figura 105 e na Figura 106.

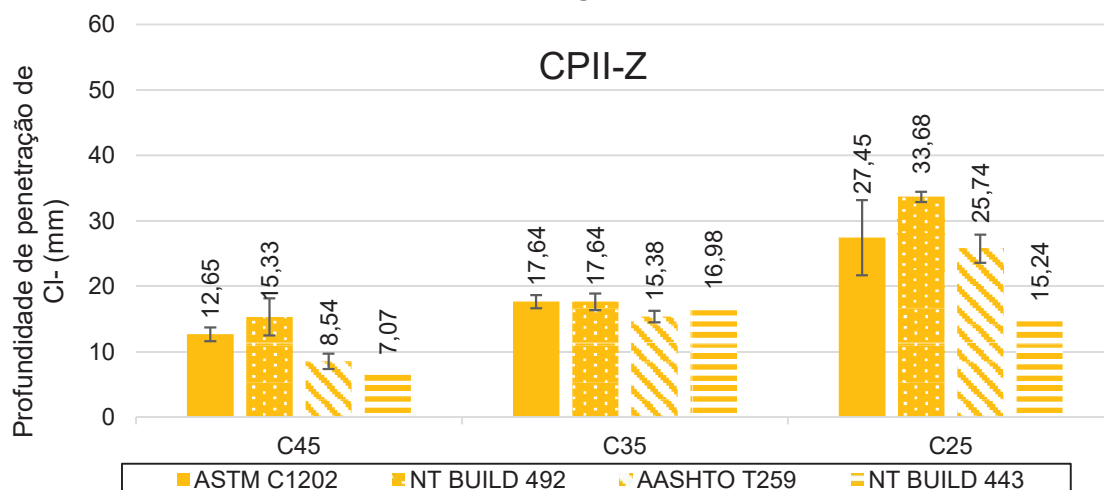
Figura 104 – Resumo dos resultados de penetração de cloreto para amostras contendo CPV-ARI



Fonte: O autor (2018)

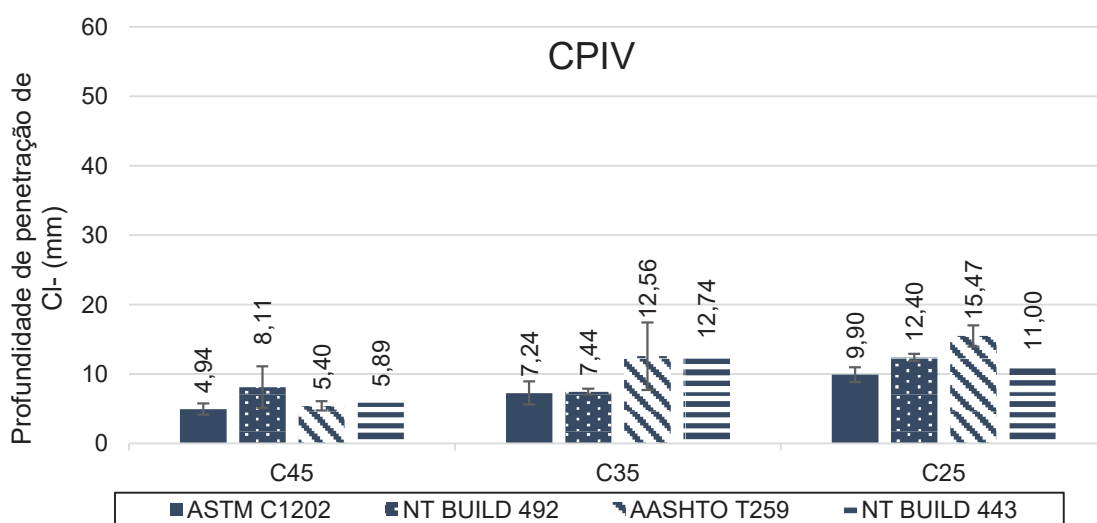
Através de análise de variância, os resultados provenientes dos ensaios acelerados (americano e nórdico), bem como aqueles provenientes dos ensaios de longa duração (americano e nórdico) foram comparados entre si. Com um nível de significância de 95%, as duas análises apresentaram apenas diferença significativa entre as classes de concreto, enquanto que os resultados comparados  diferença dos métodos utilizados mostraram-se sem variação estatística.

Figura 105 – Resumo dos resultados de penetração de cloreto para amostras contendo CPII-Z



Fonte: O autor (2018)

Figura 106 – Resumo dos resultados de penetração de cloreto para amostras contendo CPIV



Fonte: O autor (2018)

Na Tabela 24, são apresentadas as faixas de penetração de cloreto para cada ensaio a partir da aspersão de nitrato de prata. A classificação de referência é a tabela da norma americana de ensaio de migração acelerado, referente à carga passante, em coulomb, durante o ensaio. São, também, apresentados, os coeficientes de determinação referentes a cada correlação.

Tabela 24 – Faixas de profundidade de penetração de cloreto em função da penetrabilidade do íon proposta pela ASTM C1202:2017

Carga passante (Coulomb)	Penetrabilidade do cloreto (ASTM C1202:2017)	Profundidade de penetração de cloreto (mm)				
		ASTM C 1202:2017	NT BUILD 492:1999	AASHTO T259:1980	NT BUILD 443:1995	
-	-	R ²	0,8839	0,6436	0,7814	0,7275
> 4000	Alta	> 17,4	> 19,2	> 16,4	> 14,8	
2000 - 4000	Moderada	9,6 - 17,4	11,6 - 19,2	10,6 - 16,4	9,8 - 14,8	
1000 - 2000	Baixa	5,7 - 9,6	7,8 - 11,6	7,7 - 10,6	7,3 - 9,8	
100 - 1000	Muito baixa	2,2 - 5,7	4,4 - 7,8	5,1 - 7,7	5,0 - 7,3	
< 100	Negligenciável	< 2,2	< 4,4	< 5,1	< 5,0	

Fonte: O autor (2018)

A leitura de precipitação de cloreto de prata das amostras ensaiadas, segundo a própria norma ASTM C1202:2017, apresentou a correlação mais forte dentre as comparações, o que indica que a análise através da aspersão de nitrato de prata no concreto contaminado com cloreto é válida. Dadas as peculiaridades inerentes a cada método, o coeficiente R² oscilou mais para as amostras referentes aos ensaios naturais (tanto do método nórdico quanto do método americano).

Na Tabela 25, são apresentadas as faixas de penetração de cloreto para cada ensaio a partir da aspersão de nitrato de prata, porém, tendo como referência de classificação a tabela de D_{ns} proposta por Gjrv (2009) *apud* Celik *et al.* (2015). São, também, apresentados, os coeficientes de determinação referentes a cada correlação.

Comparando as duas tabelas referentes à profundidade de precipitação de AgCl apresentadas, nota-se que a análise a partir da carga passante (ASTM C1202:2017)  mais conservadora em relação  análise realizada com base no coeficiente de difuso no estado não estacionário (em média 40% menor). Isso sugere uma maior restrição da análise colorimétrica de penetração de cloreto. Entretanto, os coeficientes de correlação da comparação a partir do D_{ns} foram mais fortes (cerca de 16% superior). Conclui-se, portanto, que os valores apresentados na Tabela 25 são mais condizentes com o ingresso do cloreto no

concreto, mesmo que tenham apresentado uma tolerância maior de ingresso do íon ao longo do tempo de exposição em cada método de ensaio.

Tabela 25 – Faixas de profundidade de penetração de cloreto em função da resistência do concreto à penetração de cloreto

Dns (10 ⁻¹⁵ cm²/s)	Resistência do concreto à penetração de cloreto	Profundidade de penetração de cloreto (mm)				
		ASTM C 1202:2017	AASHTO T259:1980	NT BUILD 492:1999	NT BUILD 443:1995	
-	-	R²	0,9771	0,9802	0,9771	0,7558
> 1.5	Baixa	> 27,8	> 25,0	> 29,9	> 21,0	
1.0 - 1.5	Moderada	19,9 - 27,8	18,4 - 25,0	21,7 - 29,9	16,2 - 21,0	
0.5 - 1.0	Alta	12,1 - 19,9	11,8 - 18,4	13,6 - 21,7	11,4 - 16,2	
0.25 - 0.5	Muito alta	8,1 - 12,1	8,5 - 11,8	9,5 - 13,6	9,0 - 11,4	
< 0.25	Extremamente alta	< 8,1	< 8,5	< 9,5	< 9,0	

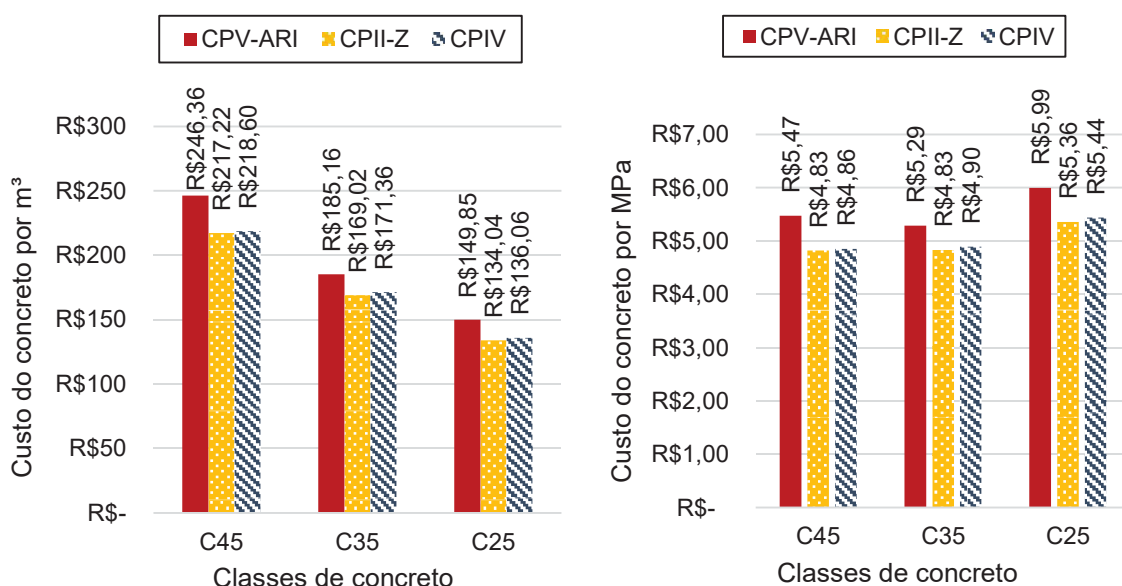
Fonte: O autor (2018)

6.4. ANÁLISE ECONÔMICA E DE VIDA ÚTIL

Como ferramenta de complementação para a comparação entre os traços de cimento apresentados, além dos resultados dos métodos de resistência à penetração do cloreto apresentados, na Figura 107, é apresentada uma comparação do custo de confecção de cada tipo de concreto, em função do volume (m³) e da resistência à compressão (MPa).

De acordo com dados obtidos a partir do fornecedor dos tipos de aglomerantes empregados neste estudo, apresentados no Capítulo 5, a comparação do concreto em função da resistência apresentou um custo similar, em torno de R\$5,05 por MPa, sendo levemente mais caro para os concretos moldados sem adição. Isso é referente ao custo do cimento CPV-ARI ser maior em relação ao custo dos cimentos CPII-Z e CPIV, o que reflete também na análise do custo por volume. Neste caso, entretanto, a diferença entre as classes de resistência se apresenta de maneira mais acentuada.

Figura 107 – Variação do custo de cada concreto em função do volume e da resistência à compressão



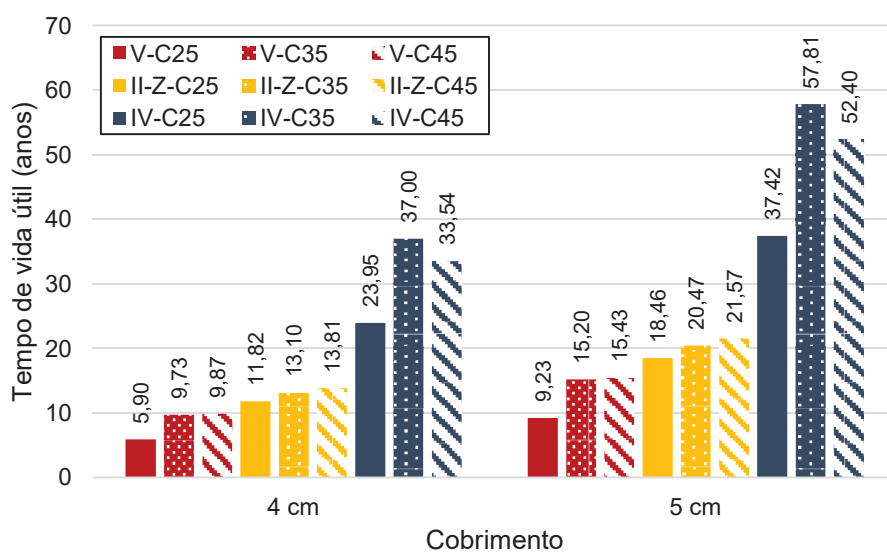
Fonte: O autor (2018)

Com relação à vida útil de uma estrutura construída a partir dos concretos desenvolvidos nesta pesquisa, contemplando dois valores diferentes de cobrimento, foi calculado o tempo para início da despassivação do aço – o que representa o fim da vida útil –, sendo apresentado na Figura 108.

Uma vez que os dados utilizados são referentes ao ensaio acelerado de migração de cloreto (ASTM C1202:2017), o comportamento do gráfico é similar. Entretanto, em termos numéricos, nota-se o bom desempenho dos concretos moldados com maior teor de cinza volante (CPIV), chegando a uma vida útil de quase 60 anos. Os ganhos médios de vida útil para este tipo de concreto foram superiores a 70% quando comparados aos concretos sem a adição pozolânica (CPV-ARI). Comparando os valores de vida útil entre os dois cobrimentos apresentados, o ganho foi de cerca de 56% quando se aumentou 1 cm no cobrimento da armadura.

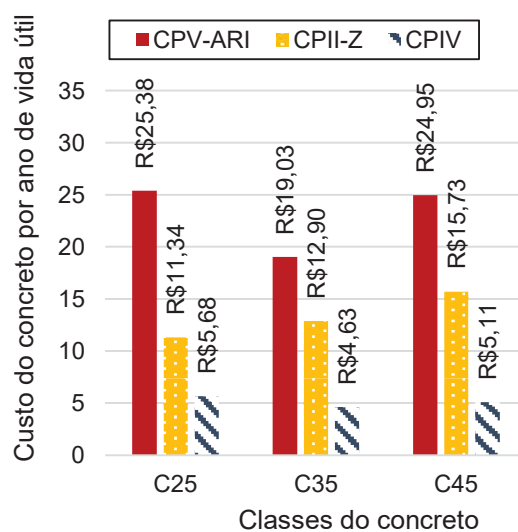
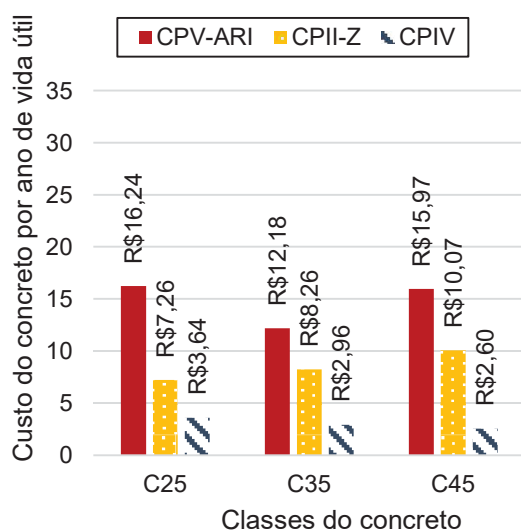
Ainda, como última análise econômica, foram calculados os custos unitários de cada tipo de concreto em função da vida útil apresentada. Os resultados são apresentados na Figura 109.

Figura 108 – Vida útil de estruturas expostas a uma concentração superficial de cloreto de 0,6%



Fonte: O autor (2018)

Figura 109 – Custo do metro cúbico de concreto em função da vida útil
Cobrimento = 4 cm



Fonte: O autor (2018)

Os custos para a produção de um concreto com 27% de adição chegaram a uma economia de até 80% em relação à produção de um concreto moldado sem cinza volante (amostra C45). A redução nos custos quando

comparados os cobrimentos de 4 e 5 centímetros foi em torno de 36%. Além do custo unitário dos cimentos compostos ser inferior ao cimento CPV-ARI, o melhor desempenho apresentado em relação à carga passante devido à adição pozolânica foi traduzido em parâmetros monetários, evidenciando a maior vantagem destes tipos de cimento.

Uma vez que a principal variação de custos foi o tipo de cimento e a utilização de aditivo superplastificante, os custos mais baratos para confecção dos concretos utilizados neste estudo são referentes àqueles dosados contendo adição de cinza volante. Com relação à finalidade de uso do material, dados os desempenhos apresentados para os métodos de ensaio utilizados neste trabalho e refletidos no custo do metro cúbico de concreto em função da vida útil, sugere-se que o concreto contendo adição de 27% de cinza volante (CPIV) mostrou o melhor desempenho. Neste cenário, a amostra IV-C45 seria a recomendada para utilização em ambientes de severa agressividade, conforme a norma brasileira de projeto ABNT NBR 6118:2014.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou os diferentes parâmetros referentes à resistência do concreto à penetração de íons cloreto a partir da comparação de quatro métodos de ensaio, sendo dois deles acelerados (ASTM C1202:2017 e NT BUILD 492:1999) e outros dois de longa duração, ditos naturais (AASHTO T259:1980 e NT BUILD 443:1995). Além disso, de maneira a considerar mais fatores e tornar a comparação entre os métodos mais preciso, foram utilizadas três variações de traços de concreto, baseados na resistência à compressão (C45, C35 e C25) e três variações de adição de cinza volante (representadas pelos cimentos CPV-ARI, CII-Z e CII-V). Nesse sentido, foi possível, também, avaliar o desempenho das nove combinações de concretos frente ao ingresso do íon cloreto, uma vez que apresentaram diferença estatística entre os resultados de caracterização e foram coerentes com o diagrama de dosagem desenvolvido. Tais resultados são referentes aos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias e aos ensaios de absorção capilar e por imersão, sendo um mecanismo de transporte importante ao ingresso de cloreto no concreto.

O ensaio americano de migração acelerada (item 6.2.1), de seis horas de duração e concentração salina de 3% de NaCl, apresentou-se como o método mais rápido de análise, com boa referência de resultados, considerando os resultados de carga passante nas amostras. Entretanto, não é possível analisar o critério de combinação do cloreto à matriz cimentícia no desenvolvimento de cloroaluminatos, o que se traduz, segundo alguns autores, em ganho de resistência contra o transporte do cloreto livre em grandes profundidades. Outro comentário sobre o método, passível de análise, é referente à oscilação da temperatura, que mostrou uma grande relação com os resultados de corrente que, neste caso, influencia a cinética de outros íons além do Cl^- . Isso provoca uma camuflagem do real desempenho do concreto, especificadamente contra a penetração do cloreto (refletida, também, na comparação com os resultados dos demais métodos, apresentados no item 6.3).

Em contrapartida, o ensaio acelerado nórdico (item 6.2.2) propõe uma variação de duração entre 6 e 96 horas de duração das amostras expostas a uma solução de 11,1% de NaCl, e é apresentado como alternativa à norma americana, principalmente devido ao maior controle da temperatura, graças à correção da tensão de aplicação ao ensaio. De fato, a correlação entre o resultado do coeficiente de difusão no estado não estacionário e a temperatura das amostras mostrou-se pouco significativa, diferente do apresentado para os resultados provenientes da norma ASTM C1202:2017. O ensaio conforme a NT BUILD 492:1999 foi realizado com duração de 24 horas e, neste caso, apresentou a possibilidade de formação de sais de Friedel como critério extra de resistência dos concretos que continham adição pozolânica. Além disso, quando comparado aos resultados de aspersão de nitrato de prata nas amostras dos quatro métodos analisados, os valores de D_{ns} apresentados mostraram um forte coeficiente de determinação, superior aos apresentados quando a mesma comparação foi realizada com os valores de carga passante do ensaio acelerado americano.

A norma americana de longa duração (90 dias) utilizada neste estudo propõe a mesma concentração que o método acelerado de mesma origem, de 3% de NaCl. A principal proposta do ensaio é de garantir que o mecanismo de transporte predominante do cloreto no concreto é a difusão iônica. Entretanto, de acordo com outros estudos, os resultados apresentados sugeriram a ocorrência de absorção capilar e do efeito wicking em paralelo à difusão. Apesar de a análise ter sido realizada em função da relação da profundidade de penetração de cloreto (a partir da aspersão de $AgNO_3$) pela raiz quadrada do tempo, o referido método de exposição ao cloreto mostrou boa correlação com os resultados de D_{ns} , provenientes do método acelerado nórdico.

Por fim, o método de difusão natural proposto pela norma nórdica apresenta um tempo mínimo de 35 dias de exposição a uma solução de alta concentração de NaCl (16,5%). Entretanto, alguns estudos apontam que, em função da qualidade do concreto em relação à porosidade e capacidade de combinação do íon, esse tempo pode não ser suficiente para se traçar um perfil de cloreto no concreto. No presente estudo, assim como para o método americano de longa duração, as amostras permaneceram em exposição por 90

dias, sendo, posteriormente, analisadas as profundidades de penetração. Apesar de uma baixa amostragem de resultados, as mesmas tendências seguiram aos demais resultados. Em comparação à metodologia acelerada de mesma origem, foi levantada a hipótese de as amostras contendo cinza volante terem apresentado desempenho superiores às aquelas sem adição devido, principalmente à combinação do cloreto no concreto. Isso foi discutido a partir da porosidade “*ink-bottle*” das amostras, além de, nas imagens de microscopia eletrônica de varredura, terem sido encontradas estruturas que possam representar o cloro-sulfoaluminato (sal de Kuzel).

Considerando os prós e contras de cada método – e tomando o tempo como um dos principais critérios para análise – entende-se que o ensaio nórdico descrito pela norma NT BUILD 492:1999 apresenta a melhor opção de estudo da resistência do concreto à penetração de cloreto, suprimindo as principais deficiências apresentadas pelo método acelerado americano, prevendo a alteração da temperatura na solução e uma concentração que permite a combinação do cloreto à matriz cimentícia.

Quanto ao tipo de cimento, a possibilidade da comparação do efeito da cinza volante sobre as amostras mostrou-se viável, uma vez que a cura utilizada neste estudo foi de 91 dias, garantindo a hidratação do cimento composto para desenvolvimento das características físicas que corroboram com os estudos que utilizam do mesmo material nas pesquisas. A variação nas classes de resistência, com alteração principal na relação a/c , também apresentou a mesma tendência inversa: quanto menor a relação, maior a resistência à penetração de cloreto. Nesse contexto, as nove combinações de concreto (variação da classe de resistência e teor de cinza volante) se complementam no sentido de calibrar os resultados dos ensaios, uma vez que as amostras dosadas com maior proporção de adição pozolânica apresentaram os melhores desempenhos de resistência à penetração do íon cloreto.

Além disso, como o presente estudo apresentou algumas lacunas durante as discussões, sugere-se que novos métodos e ensaios sejam utilizados de modo a complementar as análises e torna-las mais precisas. As propostas são descritas a seguir:

- Realizar novos estudos referentes à microestrutura das amostras contendo cinza volante, de modo a compreender a relação de porosidade e refinamento de poros e como estas propriedades refletem sobre ensaios, como o de absorção por capilaridade;
- Estudar a mobilidade iônica nos ensaios acelerados, buscando verificar o nível de influência de outros íons sobre o resultado final, principalmente referente à carga passante (ASTM C1202:2017), como apontado por diversos estudos;
- Obter o perfil de cloreto referente às amostras de concreto ensaiadas conforme os ensaios de longa duração americano e nórdico, correlacionando-os com os métodos acelerados;
- Para a norma AASTHO T259:1980, considerar a saturação do concreto previamente à exposição à solução contendo cloreto, de modo a evitar o efeito *wicking* e verificar o nível de influência sobre os resultados;
- Verificar a influência da concentração das soluções de NaCl em uma mesma metodologia, correlacionando-a com a disponibilidade de aluminatos na composição química dos aglomerantes, como método de análise da formação de sal de Friedel e sal de Kuzel;
- Comparar outros métodos de análise de cloreto, como o proposto por Castellote (2001), além de utilizar procedimentos de ciclagem, representando um aspecto próximo à realidade de condição de exposição;
- Comparar diferentes tempos de exposição à solução de cloreto nos quais seja possível determinar a duração mínima e suficiente à formação de cloroaluminatos;

Finalmente, para o desenvolvimento de uma norma nacional de durabilidade do concreto frente à exposição de íons cloreto, o presente trabalho verificou, a partir do compilado de resultados de normas de diferentes origens, a necessidade de estabelecer alguns critérios de análise e parâmetros que possam ser controlados e apresentados com maior precisão quando

comparados ao real comportamento do material. Isso diz respeito ao tipo de aglomerante utilizado e suas respectivas peculiaridades (tempo de cura, efeito físico, composição química, entre outros), a geometria e a condição de saturação das amostras, o tempo de exposição e a concentração da solução de cloreto e o controle da temperatura, no caso de um ensaio com aplicação de corrente externa.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A.; KUMAR, A. Chloride ion migration/diffusion through concrete and test methods. **International Journal of Advanced Scientific and Technical Research**, v. 6, p. 151-180, 2013.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Designation: **AASHTO T259**, Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration. Washington, 2017.

_____. Designation: **AASHTO T260**, Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials. Washington, 2009.

APONTE, D. F.; BARRA, M.; VÁSQUEZ, E. M. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 537-546, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Designation: **ASTM C125**. Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. Philadelphia, 20018.

_____. Designation: **ASTM C642**, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Philadelphia, 2013.

_____. Designation: **ASTM C1202**, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration¹. Philadelphia, 2017.

_____. Designation: **ASTM C1543**, Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding. Philadelphia, 2010.

_____. Designation: **ASTM C1556**, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. Philadelphia, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2003.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - requisitos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

AUSTRALIA STANDARDS. **AS 3600**: Concrete structures. Sydney, 2009.

BALESTRA, C. E. D.; REICHERT, T. A.; SAVARIS, G. Contribution for durability studies based on chloride profiles analysis of real marine structures in different marine aggressive zones. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 140-150, 2019a.

BALESTRA, C. E. D.; REICHERT, T. A.; PANSERA, W. A.; SAVARIS, G. Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 345-358, 2019b.

BERKE, N. S.; HICKS, M. C. Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data. **Corrosion forms and control of infrastructure**, ASTM STP 1137, V. Chacker ad. ASTM. Philadelphia, p. 207-231, 1992.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; REDAELLI, E.; POLDER, R. **Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair**. Weiheim, 2013.

BLISSETT, R. S.; ROWSON, N. A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. **Fuel**, v. 97, p. 1-23, 2012.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1411-1420, 2001.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. **Corrosion Science**, v. 44, p. 2409–2424, 2002.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo:Pini, 1997

CELIK, K.; MERAL, C.; MANCIO, M.; MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59-72, 2015.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA (CCAA). **Chloride resistance of concrete**. Report, 2009.

CHEEWAKET, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W. Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1352-1357, 2010.

CHOUSIDIS, N.; IOANNOU, I.; RAKANTA, E.; KOUTSODONTIS, C.; BATIS, G. Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 86-97, 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C.; ANDRADE, J. J. O.; MASUERO, A. B.; POSSAN, E.; MASUERO, J. R.; MENNUCCI, M. M. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, p. 223-270, 2016.

DEHGHAN, A.; PETERSON, K.; RIEHM, G.; BROMERCHENKEL, L. H. Application of X-ray microfluorescence for the determination of chloride diffusion coefficients in concrete chloride penetration experiments. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 85-95, 2017.

DIVSHOLI, B. S.; LIM, T. Y. D.; TENG, S. Durability properties and microstructure of ground granulated blast furnace slag cement concrete.

International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 8, p. 157-164, 2014.

EUROPEAN STANDARD. **EN 206**: Concrete - Specification, performance, production and conformity. Brussels, 2013.

FIGUEIREDO, E. P. Ação dos cloretos no concreto. In: **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. In: **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

FRIEDMANN, H.; AMIRI, O.; AL-T-MOKHTAR, A.; DUMARGUE, P. A direct method for determining chloride diffusion coefficient by using migration test. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1967–1973, 2004.

GENG, J.; EASTERBROOK, D.; LI, L.; MO, L. The stability of bound chlorides in cement paste with sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 211–222, 2015.

GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, Great Britain, v. 39, n. 5, p. 1001-1013, 1997.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GUIGNONGE, G. C. Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento. **Dissertação** (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993.

HIRAO, H.; YAMADA, K.; TAKAHASHI, H.; ZIBARA, H. Changes in the phase assemblage of concrete exposed to sea water. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, p. 77-84, 2005.

HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, p.411–418, 2013.

HUSSAIN, S.; BHUNIA, D. SINGH, S. B. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 26-31, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**. Rio de Janeiro, 2011. 177 p.

IOANNOU, S.; PAINE, K.; REIG, L.; QUILLIN, K. Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate–anhydrite–fly ash cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 196-204, 2015.

JEN, G.; STOMPINIS, N.; JONES, R. Chloride ingress in a belite-calcium sulfoaluminate cement matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 98, p. 130-135, 2017.

JO, H.; JANG, Y. N.; JO, H. Y. Influence of NaCl on mineral carbonation of CO₂ using cement material in aqueous solutions. **Chemical Engineering Science**, v. 80, p.232-241, 2012.

JULIO-BETANCOURT, G. A.; HOOTON, R. D. Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p.1007-1015, 2004.

KOPECSKÓ, K. Chloride ion binding capacity of clinker minerals and cements influenced by steam curing. Mestrado em Engenharia Química – Budapeste, 2006.

KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash, **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 169-182, 2019.

LANNEGRAN, R., RAMOS, G., TALERO, R. Estado del conocimiento sobre la sal de Friedel. **Materiales de Construcción**, v. 51, pp. 63-71, 2001.

LEUNG, H. Y.; KIM, J.; NADEEM, A.; JAGANATHAN, J.; ANWAR, M. P. Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 369-375, 2016.

LIMA, M. G. Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y.; MA, Y. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 217-225, 2017a.

LIU, J.; OU, G.; QIU, Q.; CHEN, X.; HONG, J.; XING, F. Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 493-501, 2017b.

LIU, J.; WANG, X.; QIU, Q.; OU, G.; XING, F. Understanding the effect of curing age on the chloride resistance of fly ash blended concrete by rapid chloride migration test. **Materials Chemistry and Physics**, v. 196, p. 315-323, 2017c.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; WANG, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, v. 112, p. 364-372, 2016

LIU, X.; CHIA, K. S.; ZHANG, M. H. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p.335-343, 2011.

LUO, R.; CAI, Y.; WANG, C.; HUANG, X. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p.1-7, 2003.

LUPING, T.; NILSSON, L.O.; BASHEER, P. A. M. **Resistance of concrete to chloride ingress. Testing and Modeling**. Abingdon: SPON PRESS, 2012.

MA, J.; LI, Z.; ZHANG, Y.; DEMOPOULOS, G. P. Desilication of sodium aluminate solution by Friedel's salt (FS: $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$). **Hydrometallurgy**, v. 99, p.225-230, 2009.

MA, J.; LI, Z.; JIANG, Y.; YANG, X. Synthesis, Characterization and formation mechanism of Friedel's salt (FS: $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) by the reaction of calcium chloride with sodium aluminate. **Journal of Wuhan University of Technology Materials Science**, v. 30, p.76-83, 2015

MA, B.; LIU, X.; TAN, H.; ZHANG, T.; MEI, J. QI, H.; JIANG, W.; ZOU, F. Utilization of pretreated fly ash to enhance the chloride binding capacity of cement-based material. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 726-734, 2018.

MARSAVINA, L.; AUDENAERT, K.; SCHUTTER, D.; FAUR, N.; MARSAVINA, D. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 264-274, 2009.

MCGRATH, P. F.; HOOTON, R. D. Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1239-1248, 1999.

MEDEIROS, M. H. F.; BORBA, A. Y.; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. R. L. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. *Revista Escola de Minas*, v. 65, p. 475-481, 2012.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; HINO JÚNIOR, J. R.; MONTEIRO, A. J. A. E.; BILL, G. H.; KAWANAMI, I. Y. Accelerated carbonation effect on electrical resistivity and sorptivity of concrete, **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 3: 7, 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, p. 116-132, 2014.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA JR., J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 667-676, 2007.

MEIRA, G. M. Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado. **Tese (Doutorado)**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MESBAH, A.; FRANÇOIS, M.; CAU-DIT-COUMES, C. Crystal structure of Kuzel's salt $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\frac{1}{2}\text{CaSO}_4\cdot\frac{1}{2}\text{CaCl}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ determined by synchrotron powder diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 5, p. 504–509, 2011.

MITTRI, S. H. M. Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade. **Dissertação** (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MOFFATT, E. G.; THOMAS, M. D. A.; FAHIM, A. Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p.127-135, 2017

MORO, F.; BÖHNI, H. Ink-Bottle Effect in Mercury Intrusion Porosimetry of Cement-Based Materials. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 246, p. 135-149, 2002.

NATH, P.; SARKER, P. K.; BISWAS, W. K. Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1694-1702, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2013.

NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, J.; NICHOLLS, R. J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. **PLoS ONE**, p.1-34, 2015

NORDTEST. **NT BUILD 492**, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments, Nordtest, Espoo, 1999.

_____. **NT BUILD 443**, concrete, hardened: accelerated chloride penetration, Nordtest, Espoo, 1995.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO_3 solution spray Method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, n°6, 1992.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 395-406, 1986.

PINTO, S. R.; MACEDO, A. L. A.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 3:3, 2018.

POLDER, R., PAN, Y., COURAGE, W., PEELEN, W. H. A. Preliminary study of life cycle cost of preventive measures and repair options for corrosion in concrete infrastructure. **Corrosion in Concrete Infrastructure**. Heron, p. 1-13, 2016.

PUYATE, Y. T.; LAWRENCE, C. J.; BUENFELD, N. R.; MCLOUGHLIN, M. Chloride transport models for wick action in concrete at large Peclet number. **Physics of Fluids**, v. 10, n. 3, p.566-575, 1998.

QIAO, C.; NI, W.; WANG, Q.; WEISS, J. Chloride diffusion and wicking in concrete exposed to NaCl and MgCl₂ solutions. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, p. 04018015-1 a 04018015-10, 2018

RABEHI M., MEZGHICHE B., GUETTALA S. Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 123-129, 2013.

RASHEEDUZZAFAR, D. F. H.; AL-SAADOUN, S. S.; AL FAHTANI, A. S.; DAKHIL, F. H. Effect of tricalcium alumina content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 723-738, 1990.

ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M.; RODRÍGUEZ, O.; RIVERA, J. Durability of blended cement pastes containing ceramic waste as a pozzolanic addition. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, p.1543-1551, 2014.

SABET, F. A.; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI, M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 175-184, 2013.

SCHMITT, G.; SCHÜTZE, M.; HAYS, G. F.; BURNS, W.; HAN, E. H.; POURBAIX, A.; JACOBSON, G. Global needs for knowledge dissemination, research, and development in materials deterioration and corrosion control. **The World Corrosion Organization**, 2009.

SCHNEIDER, J. A. Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SILVA, T. J. Mecanismos de transporte de massa no concreto. In: **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

SILVA, H. G. C.; TERRADILLOS, P. G.; ZORNOZA, E.; MENDOZA-RANGEL, J. M.; CASTRO-BORGES, P. ALVARADO, C. A. J. Improving sustainability through corrosion resistance of reinforced concrete by using a manufactured blended cement and fly ash. **Sustainability**, 10, 1-15, 2018.

SIMČIČ, T.; PEJOVNIK, S.; SCHUTTER, G. D.; BOSILJKOV, V. B. Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting–drying cycles. **Construction and Building Materials**, v. 93, p.1216-1223, 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - 2009**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - 2013**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Resultados preliminares de Maio de 2018**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=25>. Acesso em 17 de junho de 2018.

SØRENSEN, H. E., POULSEN, S. L. Effect of curing regime and controlled permeability formwork on early chloride penetration into fly ash concrete. In: **High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet**. Cham: SPRINGER, 2017.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review, **FHWA Contract DTFH61-97**, University of Toronto, Canada, 2001.

SURYAVANSHI, A. K.; SCANTLEBURY, J. D.; LYON, S. B. The binding of chloride ions by sulphate resistant Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 581-592, 1995.

TANG, L; SØRENSEN, H. E. Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete. **Materials and Structures**, v. 34, p. 479-485, 2001.

TANG, L.; NILSSON, L. O. rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, v. 89, p. 49-53, 1992.

TISBIEREK, F. T.; RATHER, L. P. R.; NOBRE, T. R. S.; ANDRADE, J. J. O. Avaliação da penetração de íons cloreto no concreto. **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**, n. 1, p. 279-287, 2002.

THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D.; SCOTT, A.; ZIBARA, H. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1-7, 2012.

THOMAS, M. D. A.; BENTZ, E. C. Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, **Life365 Manual**, SFA, pp. 12-56, 2002.

THOMAS, R. J.; ARIYACHANDRA, E.; LEZAMA, D.; PEETHAMPARAN, S. Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 104-111, 2018.

TRUC, O.; OLLIVIER, J.P.; CARCASSE'S, M. A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 217–226, 2000.

TUUTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. 468p.
VALIPOUR, M.; SHEKARCHI, M.; AREZOUMANDI, M. Chlorine diffusion resistivity of sustainable green concrete in harsh marine environments. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4092-4100, 2017

VARGAS, A. .; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F.; SILVA, F. J.; PAVÃO, B.; VEIT, H. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 653-660, 2011.

WANG, J.; BASHEER, P. A. M.; NANUKUTTAN, S. V.; LONG, A. E.; BAI, Y. Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 108, p.56-66, 2016.

WEERDT, K. D.; JUSTNES, H.; GEIKER, M. R. Changes in the phase assemblage of concrete exposed to sea water. **Cement and Concrete Composites**, v. 47, p. 53-63, 2014.

YILDRIM, H.; ILICA, T.; SENGUL, O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1282-1288, 2011.

YUAN, Q.; SANTHANAM, M. Test methods for chloride transport in concrete. In: **Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments**, v. 10. Netherlands: SPRINGER, 2012

YUAN, Q.; SHI, C.; DE SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K. DENG, D. Chloride binding of cement based materials subjected to external chloride environment – a review. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1-13, 2009.

ZHANG, D.; JIA, Y.; MA, J.; LI, Z. Removal of arsenic from water by Friedel's salt (FS: 3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O). **Journal of Hazardous Materials**, v. 195, p.398-404, 2011.